

**OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE
LA EMPRESA INCAUCA S.A.**

CESAR AUGUSTO GALVIS RIZO

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

**OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE
LA EMPRESA INCAUCA S.A.**

CESAR AUGUSTO GALVIS RIZO

**Trabajo de Pasantía para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JUAN RICARDO VIDAL MEDINA
Ingeniero Mecánico (MSc.)
Docente Departamento de Energética y Mecánica**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

Nota de Aceptación:

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico.

JUAN RICARDO VIDAL MEDINA

Director

Santiago de Cali, 24 de Julio de 2008

A la memoria de mi Padre Guillermo Galvis Castaño, por todo su amor, apoyo y comprensión a lo largo de su vida. Gracias por ser el ejemplo que fuiste.

A mi Madre Libia Rizo de Galvis por tu amor, paciencia y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo incondicional, en especial a mis Padres por su paciencia e inmenso esfuerzo para la culminación de mis estudios.

Al Ingeniero Pedro Nel López López Superintendente de fábrica por la oportunidad de realizar este proyecto en INCAUCA S.A.

Al Ingeniero Milton Sánchez Rengifo, Jefe de Sección Calderas de INCAUCA S.A. por ser mi guía y por su ayuda en la consecución de los objetivos de este proyecto.

A todo el personal de INCAUCA S.A. que día a día me colaboraron en la ejecución de este proyecto, en especial a los funcionarios de Calderas.

A mi director el Ingeniero Juan Ricardo Vidal Medina por su orientación y ayuda en el logro de los objetivos de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCION	15
INTRODUCCION	16
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2 JUSTIFICACION	18
3 OBJETIVOS	19
3.1 GENERAL	19
3.2 ESPECIFICOS	19
4 ANTECEDENTES	20
5 METODOLOGIA	21
5.1 FLUJO DE COMBUSTIBLES HACIA LAS CALDERAS	21
5.2 EFICIENCIAS ENERGETICAS	21
5.3 MEJORAMIENTO DE MEZCLAS DE CARBON	21
5.4 GENERACION DE RECOMENDACIONES DE MEJORAS	21
6 MARCO TEORICO	22
6.1 PROCESO PRODUCTIVO DE INCAUCA S.A.	22
6.2 DEFINICION DE CALDERA	26
6.3 CALDERAS PIROTUBULARES	27

6.4	CALDERAS ACUOTUBULARES	28
7	SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR DE INCAUCA S.A.	42
7.1	VENTILADORES INSTALADOS	44
7.2	PARAMETROS DE DISEÑO	46
8	PROBLEMÁTICA SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE INCAUCA S.A.	49
8.1	FLUJO DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLES	49
8.2	CALCULO DE EFICIENCIAS	50
9	CALCULO DEL FLUJO DE COMBUSTIBLES	52
9.1	CARBON	52
9.1.1	Método De Medición De Consumo De Carbón En Calderas.	53
9.1.2	Calculo De La Velocidad De Las Bandas.	53
9.1.3	Calculo Del Tiempo De Trabajo De Las Bandas.	55
9.1.4	Cantidad De Carbón Por Metro De Banda Transportadora.	56
9.1.5	Balance De Masa Carbón.	57
9.2	BAGAZO	61
9.3	BALANCE DE MASA BAGAZO	64
9.4	BAGACILLO	65
9.5	BALANCES DE MASA BAGACILLO	68
10	BALANCE TERMICO DE LAS CALDERAS	72
10.1	BALANCE MASA Y ENERGIA	72

10.2	EFICIENCIA CALDERA DISTRAL 4 METODO INDIRECTO	74
10.3	EFICIENCIA CALDERA DISTRAL 3 METODO INDIRECTO	85
10.4	CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 1	94
10.5	CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 3	96
10.6	CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 4	98
11	PLANTEAMIENTO DE MEJORAS	101
11.1	PROPUESTA DE MEZCLAS DE CARBON	101
11.1.1	Comprando Solo Carbon De Vitonas Y Carretera.	104
11.1.2	Reducción En La Compra De Carbón De Carretera.	106
11.2	CONSUMO DE CARBON EN CALDERAS	108
12	ANÁLISIS ECONOMICO	113
13	CONCLUSIONES	116
14	RECOMENDACIONES	118
	BIBLIOGRAFIA	119
	ANEXOS	120

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis Último De Combustibles	46
Tabla 2. Parámetros De Diseño Calderas Distral 1, 2, 3 Y 4	48
Tabla 3. Ultimo Balance Térmico Calderas Incauca S.A.	50
Tabla 4. Velocidad Bandas Alimentación Carbón Distral 4	54
Tabla 5. Peso De Carbón Bandas Transportadoras – Corrección Por Humedad	56
Tabla 6. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Mayo 2008	58
Tabla 7. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Junio De 2008	59
Tabla 8. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Julio De 2008	60
Tabla 9. Balance De Masa Bagazo Incauca S.A. Marzo 2008	65
Tabla 10. Balance De Masa Bagazo Incauca S.A. Abril 2008	65
Tabla 11. Consumo Bagacillo Incauca S.A. Marzo 2008	69
Tabla 12. Consumo Bagacillo Incauca S.A. Abril 2008	69
Tabla 13. Datos De Operación Caldera Distral 4 – Prueba Eficiencia	74
Tabla 14. Propiedades De La Ceniza Distral 4	75
Tabla 15. Análisis Isocinetico De Gases De Combustión Caldera Distral 4	76
Tabla 16. Propiedades Combustibles De Alimentación Distral 4	77
Tabla 17. Calculo Del Aire Requerido Para La Combustión Distral 4	78
Tabla 18. Volumen De Los Productos De Combustión Distral 4	79
Tabla 19. Calor Disponible Distral 4	80
Tabla 20. Perdida De Calor Por Humedad En El Combustible Distral 4	80

Tabla 21. Perdida De Calor Por Humedad En El Aire De Combustión Distral 4	80
Tabla 22. Perdida De Calor Por Hidrogeno En El Combustible Distral 4	81
Tabla 23. Perdida De Calor Gases Secos En Chimenea Distral 4	81
Tabla 24. Perdida De Calor Por Combustión Incompleta Distral 4	81
Tabla 25. Perdida De Calor Por Combustible No Quemado Distral 4	82
Tabla 26. Perdidas Por Radiación Y Convección Distral 4	83
Tabla 27. Perdidas Por Purgas Distral 4	83
Tabla 28. Perdidas Indeterminadas Distral 4	83
Tabla 29. Calor Útil Distral 4	84
Tabla 30. Gasto De Combustible Distral 4	84
Tabla 31. Eficiencia Térmica Indirecta Distral 4	84
Tabla 32. Eficiencia Térmica Directa Distral 4	85
Tabla 33. Datos De Operación Caldera Distral 3 – Prueba Eficiencia	86
Tabla 34. Propiedades De La Ceniza Distral 3	86
Tabla 35. Propiedades Combustibles De Alimentación Distral 3	87
Tabla 36. Análisis Isocinetico De Gases De Combustión Caldera Distral 3	87
Tabla 37. Volumen De Los Productos De Combustión Distral 3	88
Tabla 38. Volumen De Los Productos De Combustión Distral 3	89
Tabla 39. Calor Disponible Distral 3	89
Tabla 40. Perdida De Calor Por Humedad En El Combustible Distral 3	90
Tabla 41. Perdida De Calor Por Humedad En El Aire De Combustión Distral 3	90
Tabla 42. Perdida De Calor Por Hidrogeno En El Combustible Distral 3	90
Tabla 43. Perdida De Calor Gases Secos En Chimenea Distral 3	90

Tabla 44. Perdida De Calor Por Combustión Incompleta Distral 3	91
Tabla 45. Perdida De Calor Por Combustible No Quemado Distral 3	91
Tabla 46. Perdidas Por Radiación Y Convección Distral 3	92
Tabla 47. Perdidas Por Purgas Distral 3	92
Tabla 48. Perdidas Indeterminadas Distral 3	92
Tabla 49. Calor Útil Distral 4	93
Tabla 50. Gasto De Combustible Distral 3	93
Tabla 51. Gasto De Combustible Distral 3	93
Tabla 52. Eficiencia Térmica Directa Distral 3	94
Tabla 53. Eficiencias Caldera Distral 1 Incauca S.A.	95
Tabla 54. Eficiencias Caldera Distral 3 Incauca S.A.	97
Tabla 55. Porcentajes De Combustibles Alimentados Distral 3	97
Tabla 56. Eficiencias Caldera Distral 4 Incauca S.A.	99
Tabla 57. Porcentajes De Combustibles Alimentados Distral 4	99
Tabla 58. Propiedades De Mezclas De Carbón Óptimas Vitonas - Carretera	102
Tabla 59. Propiedades De Mezclas De Carbón Optimas Valle (Propal) - Carretera	102
Tabla 60. Promedios Pruebas Mezclas Carbón Valle – Carretera	102
Tabla 61. Análisis Carbón Alimentación – Mezclas Propuestas	108
Tabla 62. Toneladas Vapor X Toneladas De Carbón – Mes A Mes	113
Tabla 63. Ahorro En Consumo De Carbón – Mayo Y Junio	114
Tabla 64. Costo Carbón Por Minas	114
Tabla 65. Ahorro En Consumo De Carbón – Junio Y Julio	114

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso Productivo De Incauca S.A.	22
Figura 2. Esquema Caldera Piro tubular	27
Figura 3. Caldera Piro tubular Industrial	28
Figura 4. Principio De Funcionamiento De Una Caldera Acuotubular	29
Figura 5. Esquema Caldera Acuotubular	30
Figura 6. Atemperación Directa Por Contacto Indirecto	35
Figura 7. Atemperación Directa Por Inyección De Agua	35
Figura 8. Ubicación Componentes Caldera Acuotubular	37
Figura 9. Caldera Acuotubular Multitambores De Vapor	38
Figura 10. Caldera Acuotubular De Tambor Longitudinal	38
Figura 11. Caldera Acuotubular De Tambor Cruzado	39
Figura 12. Caldera Acuotubular Tipo Stirling O De Tubos Doblados	40
Figura 13. Calderas Acuotubular Tipo A, O Y D	40
Figura 14. Caldera Acuotubular Industrial	41
Figura 15. Sistema De Vapor De Incauca S.A.	43
Figura 16. Esquema General. Calderas Acuotubulares Tipo D Incauca S.A.	45
Figura 17. Calderas Sistema De Vapor De Incauca S.A.	46
Figura 18. Distribución Del Bagazo En Incauca S.A.	49
Figura 19. Esquema Manejo De Carbón De Incauca S.A.	52
Figura 20. Esquema Bandas Transportadoras De Carbón	54
Figura 21. Motores Bandas Transportadoras Distral 4	55

Figura 22. Alimentación De Carbón Distral 3	56
Figura 23. Banda De Carbón Distral 3	57
Figura 24. Aforo Másico De Bandas De Carbón	57
Figura 25. Sistema De Conductores De Bagazo De Incauca S.A.	61
Figura 26. Conductor De Bagazo De Tablillas	61
Figura 27. Conductor De Bagazo De Tablillas De Los Chutes	62
Figura 28. Transmisión De Movimiento Hidráulica Alimentadores De Bagazo	62
Figura 29. Chutes De Bagazo	63
Figura 30. Alimentación De Bagacillo	66
Figura 31. Conductores Tornillo Sin Fin De Bagacillo	66
Figura 32. Aforo De Bagacillo	67
Figura 33. Almacenamiento De Bagazo	70
Figura 34. Balance Masa Y Energía Caldera Distral 4	72
Figura 35. Balance De Masa Y Energía Caldera Distral 3	73
Figura 36. Balance De Masa Y Energía Calderas Distral 1 Y 2	73
Figura 37. Balance Térmico Caldera Distral 1	96
Figura 38. Comparativo Diario Consumo De Carbón – Mayo, Junio Y Julio	109
Figura 39. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Mayo 2008	110
Figura 40. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Junio 2008	111
Figura 41. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Julio 2008	111
Figura 42. Tendencia Consumo Carbón Vs. Generación Vapor	112

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Principio De Funcionamiento De Los Weightometros	120
Anexo B. Carta Psicrometrica Del Aire	122
Anexo C. Código De Pruebas De La Asme “Asme Power Test Codes”	123
Anexo D. Mezclas Vitonas-Carretera Y Valle (Propal)-Carretera	134
Anexo E. Análisis De Carbón De Tolva 2008	135
Anexo F. Consumo De Carbón Vs. Generación Vapor	136
Anexo G. Toneladas Vapor / Toneladas De Carbón	137
Anexo H. Análisis Elemental Y Próximo De Combustibles	138

RESUMEN

En este documento se presentaran la optimización de las calderas del sistema de generación de vapor de la empresa Incauca S.A., con el objetivo de disminuir los costos de Generación de Vapor mediante el balance del combustible suministrado a las calderas del central azucarero Incauca S.A., disminuyendo principalmente el consumo de carbón y aumentando el consumo de biomasa como combustible. Para lograr esto primero se debieron plantear métodos de medición de consumo para los combustibles de alimentación para así tener control sobre estos y plantear alternativas para aumentar las propiedades fisicoquímicas del carbón y así con menos cantidades de carbón liberar una misma energía necesaria para determinadas producciones de vapor. Las propiedades del carbón se mejoraron realizando mezclas alternativas según las minas de procedencia.

Se realizaron dos pruebas de eficiencias térmicas utilizando el Método Indirecto y el Método Directo aplicando la norma "Asme Power Test Codes" para el cálculo de eficiencias energéticas en generadores de vapor. Se encontraron en la caldera Distral 3 una eficiencia Indirecta del **66.73%** y una Directa del **66.76%**, lo que nos da un margen de error de tan solo el 0,05% y en la caldera Distral 4 una eficiencia Indirecta del **70,33%** y una Directa del **67,00%**, lo que nos da un margen de error del 3,09%; de esta manera se corrobora que las mediciones de consumos de combustibles eran factibles.

Se realizaron mediciones de eficiencias directas diarios (24 horas) y se halló una eficiencia máxima de **65,33%** para la caldera Distral 3 y de 67,11% para caldera Distral 4. Para la caldera Distral de halló una eficiencia promedio de **36,43%** debido a la reducción de vapor de 650psi a 275psi.

Incauca S.A. ha ahorrado en consumo de carbón debido a las implementaciones hechas **\$227.35.383,57** en los meses de Mayo, Junio y Julio del 2008.

INTRODUCCION

El sistema de generación de vapor en los ingenios azucareros es fundamental para el funcionamiento de todos los procesos productivos. El vapor en Incauca S.A. es utilizado en el proceso de molienda de caña de azúcar a altas presiones para mover los molinos, en el proceso de elaboración del azúcar donde es utilizado en diferentes etapas, en el proceso de generación de energía y en la destilería de alcohol carburante.

Debido a la gran importancia de este proceso es necesario mantener control sobre todas las variables que manejan las calderas y buscar la mejor combinación de estas para tener un proceso más eficiente y con bajos costos

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Ingenio del Cauca S.A. en el proceso de generación de vapor cuenta con 4 calderas acuotubulares tipo D marca Distral con una capacidad nominal total para generar 800.000 libras de vapor por hora distribuidas de la siguiente manera:

- ♦ Dos calderas de 150.000 Lb/h a 275psig y 550°F – Distral 1 y 2
- ♦ Una caldera de 200.000 Lb/h a 650psig y 750°F – Distral 3
- ♦ Una caldera de 300.000 Lb/h a 650psig y 750°F – Distral 4

Las calderas Distral 1 y 2 son calderas que queman bagazo entero como único combustible y las calderas 3 y 4 consumen bagazo entero, bagacillo y carbón mineral.

Para tener un buen funcionamiento de este proceso es necesario tener control sobre cada una de las calderas que componen el sistema. Esto se logra realizando mediciones de eficiencias energéticas en cada caldera, para luego analizar cada una de las variables involucradas en el proceso de generación de vapor, como lo son el consumo y la proporción de los combustibles entrando al hogar, el manejo de los ventiladores, la salida de cenizas y el control sobre los gases de escape hacia la atmósfera.

En Incauca S.A. a la fecha no se realiza medición de flujo de combustibles, sin los cuales es imposible tener una medición exacta en las calderas 3 y 4, ya que al tener una mezcla de varios combustibles no se puede obtener fácilmente el poder calórico real que estaría entrando en el hogar de las calderas.

El carbón mineral que combustiona en las calderas Distral 3 y 4 proviene de una mezcla hecha en la bodega de carbón alimentada por carbones de diferentes partes del país (Valle del Cauca, Cundinamarca, Antioquia y Boyacá). Actualmente esta mezcla se realiza solamente buscando equilibrar la humedad entre dichos carbones; es necesario buscar uno o varios tipos de mezclas que posean propiedades optimas para su utilización y con bajos costos.

Aunque el sistema de generación de vapor funciona normalmente bien, es necesario tener control sobre todas estos factores que afectan el rendimiento de cada una de las calderas, y de esta manera tener un proceso mucho mas eficiente y controlado.

2 JUSTIFICACION

El sistema de generación de vapor es fundamental para el funcionamiento de todos los procesos productivos en los Ingenios azucareros, ya que dichos procesos necesitan de vapor a altas presiones y temperaturas para convertirlo en energía mecánica y/o para aprovecharlo en el proceso.

Los generadores de vapor de Incauca S.A. son maquinas térmicas que consumen grandes cantidades de combustibles, los cuales representan altos costos de funcionamiento y requirieren un manejo que cumpla con las normas ambientales de Colombia, por lo cual es necesario controlar el consumo de estos para tener un proceso mucho mas eficiente, con menores costos de producción y cumpliendo con las leyes ambientales actuales.

Al buscar mejores parámetros de operación de cada una de las calderas del sistema de generación de vapor se obtendrán beneficios como:

- Mayor control sobre el consumo de combustibles en cada una de las calderas.
- Generación de vapor con mayor consumo de biomasa en lugar de carbón mineral.
- Reducción de costos de operación y emisiones contaminantes del medio ambiente.
- Al estandarizar los parámetros de operación se tendrá más control sobre los operarios que manejan el sistema, en cuanto a la variación del consumo de combustibles con las mismas demandas de vapor.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Disminuir los costos de generación de vapor mediante el balance del combustible suministrado en las calderas del proceso de generación de vapor del ingenio azucarero Incauca S.A.

3.2 ESPECIFICOS

- Medición de flujo másico de cada uno de los combustibles que se suministra al sistema de generación de vapor del ingenio azucarero Incauca S.A.
- Calculo de eficiencias energéticas en las calderas del sistema de generación de vapor del ingenio azucarero Incauca S.A.
- Balances de masa y energía de las 4 calderas del sistema de generación de vapor del ingenio azucarero Incauca S.A.
- Balance de mezclas de combustibles para mejorar la eficiencia de las calderas.

4 ANTECEDENTES

En los ingenios azucareros de Colombia se utilizan calderas acuotubulares donde se quema carbón y bagazo; adicionalmente en algunos ingenios como Incauca, Mayagüez, Central Castilla, Providencia, se utiliza adicionalmente como combustible bagacillo*. En ninguno de los ingenios de nuestra región sur occidente se realizan mediciones de los flujos de los biocombustibles que alimentan las calderas, lo que crea altas incertidumbres en los balances másicos y energéticos en los sistemas de generación de vapor.

El único combustible que cuenta en la mayoría de los ingenios con medidores es el carbón en la mayoría de las empresas se controla por medio de un instrumento de medición llamado weightometros (Ver Anexo A) el cual marca en tiempo real su consumo.

En la reunión bibliográfica realizada se encontraron trabajos donde se calculan eficiencia energética en calderas pirotubulares y acuotubulares, de manejo de un solo combustible. No se encontraron trabajos en ingenios azucareros relacionados con el mejoramiento del suministro de combustibles al sistema de generación de vapor.

* Residuo de las plantas de desmedulado de bagazo para la industria papelera para empresas como Propal S.A.

5 METODOLOGIA

5.1 FLUJO DE COMBUSTIBLES HACIA LAS CALDERAS

Se implementaron tres métodos distintos para medir cada uno de los combustibles de alimentación de las calderas (carbón, bagazo y bagacillo), de acuerdo a investigaciones hechas en otros ingenios azucareros de la región, y por experimentación propia dentro de la empresa.

5.2 EFICIENCIAS ENERGETICAS

Se realizaron numerosas evaluaciones de eficiencias energéticas en cada una de las 4 calderas en periodos de 24 horas, por el método directo, habiendo realizado previamente una medición de eficiencia energética en las calderas Distral 3 y 4 por el método indirecto para detectar las mayores perdidas y así poder realizar acciones correctivas para contrarrestar dichas perdidas.

5.3 MEJORAMIENTO DE MEZCLAS DE CARBON

Se realizaron diferentes mezclas de carbón, de acuerdo a las minas de procedencia buscando una mezcla con un poder calórico dentro del rango establecido en el ingenio, con el mejor costo.

5.4 GENERACION DE RECOMENDACIONES DE MEJORAS

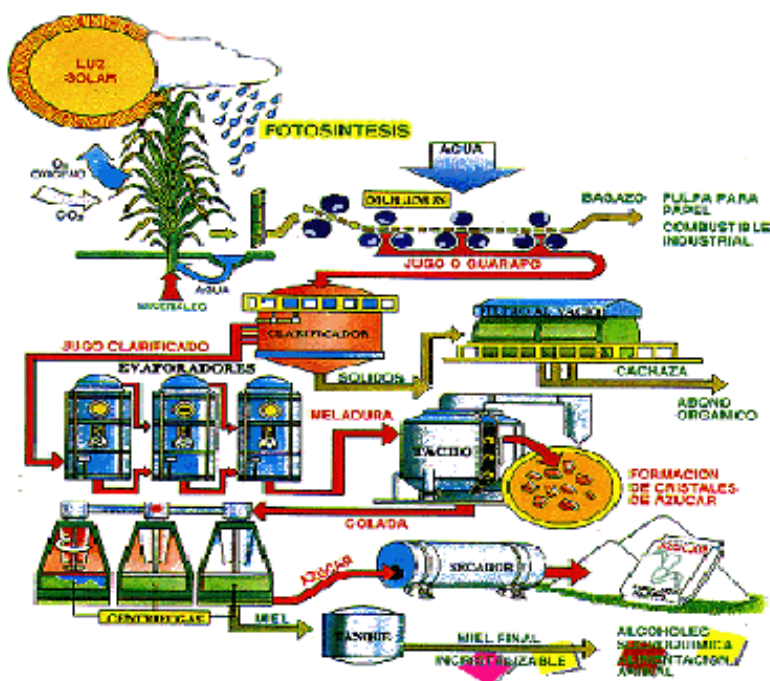
Se analizo toda la información y resultados obtenidos y se recomendaron diferentes condiciones de operación para conseguir altas eficiencias energéticas con menor costo de operación.

6 MARCO TEORICO

6.1 PROCESO PRODUCTIVO DE INCAUCA S.A.

INCAUCA S.A. es una empresa dedicada a la producción de azúcar crudo, refinado y alcohol carburante a partir de la caña de azúcar. Esta empresa está dividida en 4 departamentos: Elaboración, Refinería, Destilería y Compostaje.

Figura 1. Proceso Productivo De Incauca S.A.



Fuente: Manual de Procesos División Elaboración. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. p. 3.

La producción de azúcar en el ingenio azucarero Incauca S.A. se desarrolla en los siguientes procesos:

♦ **Preparación y Alimentación de Caña para los Molinos:** La caña proveniente de la báscula es descargada o almacenada en los patios de caña. Por medio de los puente grúa, las grúas de hilo, la caña es cargada a las mesas de

♦ alimentación donde se realiza el proceso de lavado para retirar sólidos, posteriormente es llevada a los conductores de caña donde es desfibrada por medio de las picadoras de caña dispuestas en estos; finalmente se entrega al primer molino.

El procedimiento de alimentación y preparación de caña es realizado de acuerdo con el programa de molienda establecido entre las áreas de Fábrica y Cosecha.²

♦ **Molienda De Caña:** La caña proveniente de los patios de caña es alimentada al molino a través de las mesas y los conductores transversal, auxiliar y principal. Los conductores auxiliar (No. 1) y principal (No. 2) poseen niveladores que mantienen un colchón uniforme en el conductor hasta la entrada del molino y cada uno tiene una picadora que pica la caña en trozos, rompiendo la corteza para así facilitar la extracción del jugo. Esta caña picada es pasada por un conductor de banda sobre el cual se tiene un electroimán para atrapar elementos metálicos que se encuentren en la caña picada. Posteriormente pasa por cada uno de los molinos del tándem en donde es sometida a una fuerza de compresión entre las mazas superior y cañera en la entrada, y superior bagacera en la salida, debido a la fuerza aplicada directamente sobre la maza superior por el sistema hidráulico. Dicha compresión al actuar sobre la fibra extrae o exprime el jugo de la caña.³

♦ **Proceso De Elaboración:** En la División de Elaboración se realizan los siguientes procesos:

- Pesaje, sulfitación y alcalización del jugo.
- Calentamiento y clarificación del jugo.
- Filtración de lodos y clarificación de jugo filtrado.
- Evaporación de jugo.
- Clarificación y sulfitación de meladura.
- Cristalización.
- Centrifugación.
- Secado, enfriamiento.
- Envasado y despacho a granel.
- Recuperación de enjuagues
- Control de aguas residuales.
- Potabilización de agua.

El jugo diluido de los molinos se pesa para efectos de control y contabilidad de fábrica en básculas electrónicas provistas de celdas de carga. Luego se lleva a las torres de sulfitación donde se pone en contacto con los gases producidos en la combustión del azufre. Estos gases (SO_2) decoloran el jugo, tienen un efecto

² R612002 Preparación y Alimentación de Caña para los Molinos. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. 2 h.

³ R612003 Molienda de Caña. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. 2 h.

bactericida y ayudan a reducir su viscosidad. Este jugo tiene un pH entre 4.3 y 4.5, se llama jugo sulfitado.

La acidez del jugo sulfitado se neutraliza adicionándole lechada de Cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), con la cual se eleva el pH a 7.2 -7.5. La Cal también ayuda a precipitar las impurezas orgánicas e inorgánicas que contiene el jugo. Este material se llama jugo alcalizado. Para acelerar la reacción coagulante de la Cal, se calienta el jugo alcalizado en dos etapas hasta una temperatura de 105 °C en calentadores de tubos. Este calentamiento elimina los microorganismos presentes.

El jugo alcalizado caliente se pasa por un tanque de expansión súbita (Flash Tank), en el cual se evapora alguna parte del agua que tiene el jugo, y se alimenta en paralelo a los Clarificadores de sedimentación, en ellos las impurezas del jugo (barro y sustancias coloidales formadores de compuestos coloreados) se precipitan por la acción de la gravedad. El proceso de clarificación continuo se ayuda con la adición de floculantes (polímeros sintéticos aniónicos de alto peso molecular) los cuales al entrar en contacto con el jugo forman una especie de red que atrapa las impurezas y las precipita. El proceso de clarificación separa un jugo limpio llamado jugo clarificado el cual desborda por la parte superior de los clarificadores a una temperatura de 95-98 °C y un pH de 6.8-7.2, dicho jugo se pasa por un filtro de mallas para retirar bagacillo. En el fondo se obtiene un precipitado compuesto por lodos denominado Cachaza.

Los lodos sedimentados se remueven de los clarificadores y se conducen a filtros al vacío donde se les extrae el jugo azucarado que contienen. La filtración consiste en tomar la cachaza y adicionarle bagacillo (partícula fina de bagazo) para darle mayor consistencia y mejorar la filtrabilidad, a continuación se pasa por filtros rotatorios al vacío que retiran la parte líquida, denominada jugo filtrado, quedando una torta seca que por medio de bandas se envía a las tolvas para almacenamiento, de donde se lleva al campo para utilizarla en el acondicionamiento de suelos.

El jugo filtrado se clarifica por fosflotación (Talofiltrado). Este es un proceso donde se adiciona Acido Fosfórico, Cal, pequeñas burbujas de aire micronizado y floculante al jugo filtrado para coagular las impurezas. Posteriormente el jugo filtrado se alimenta a dos clarificadores de flotación instalados en serie, donde las impurezas por el aire que contienen suben a la superficie, se remueven y se unen a la cachaza extraída de los clarificadores de jugo. El jugo filtrado clarificado se remueve del fondo, se pasa por un filtro de mallas para retirarle bagacillo y se mezcla con el jugo clarificado que va a los evaporadores.

El jugo clarificado se bombea a un sistema de evaporación de quintuple efecto para eliminarle parte del agua que contiene. Por medio de vapor y el vacío los evaporadores concentran el jugo desde 15 a 60° Brix . El jugo concentrado tiene una concentración que le da un aspecto viscoso y una coloración ligeramente marrón y se denomina meladura o jarabe.

La meladura que sale del último evaporador se purifica por fosflotación. La operación es similar a la descrita para clarificar el jugo filtrado. Se diferencian porque la meladura debe calentarse previamente hasta 85°C para disminuir su viscosidad y porque los dos clarificadores operan en paralelo. El calentamiento se hace en calentadores de tubos. La espuma removida en el clarificador de meladura es retornada a la etapa de alcalización.

La meladura clarificada se envía a una torre de sulfitación donde se pone en contacto con los gases producidos por la combustión de azufre (SO₂), para reducir su coloración y viscosidad antes de la cocción.

Para la producción de azúcar a partir de la meladura se utiliza un sistema de dos plantas o etapas. Las diferentes plantas se elaboran en los tachos, evaporadores de simple efecto que trabajan al vacío y están diseñados para operar con materiales más densos y viscosos.

En la primera etapa el jarabe se pone en contacto con núcleos de azúcar (grano muy fino de azúcar, conocido como Semilla B, que se obtiene de centrifugar las masas B). Tales núcleos se alimentan de la sacarosa que contiene el jarabe, creciendo y formando un conjunto o masa de granos conocido como masa A. El proceso tiene algunas variaciones dependiendo del tipo de azúcar que se vaya a elaborar.

Cuando el volumen de masa dentro del tacho copa su capacidad y tiene la consistencia (brix) deseada, se descarga a unos recipientes denominados cristalizadores y de allí se pasa al centrifugado o purga.

En las centrífugas se separan los cristales (azúcar) del licor madre (miel). Cuando se purga una masa A se obtiene azúcar comercial (azúcar A) y miel A.

La miel A se alimenta a una segunda etapa de cristalización, utilizando como núcleo suspensión alcohólica (mezcla de azúcar pulverizada y alcohol isopropílico) para inducir la formación de cristales a partir de la sacarosa contenida en ella, obteniendo la masa B.

Cuando se purga una masa B se obtiene miel B y azúcar B. Esta última se usa como semilla en los cocimientos de masa A, mientras que la miel B es enviada a la destilería para la producción de Alcohol Carburante.

El azúcar A o azúcar comercial sale húmedo y se debe secar antes de envasarlo, para tal fin se hace pasar por secadores rotatorios en los cuales se ponen en contacto en contracorriente el azúcar húmedo y aire calentado en radiadores por vapor, para disminuir el contenido de humedad del azúcar desde 1% hasta 0.05%. Este proceso inhibe la acción microbiana e impide la formación de terrones.

El azúcar sale de las secadoras a una temperatura de 55-60°C, una fracción destinada a las líneas de consumo familiar se somete a un enfriamiento con aire. Las enfriadoras son cilindros rotatorios similares a las secadoras donde se pone en contacto en contracorriente el azúcar caliente con aire a temperatura ambiente. El azúcar a la salida de las enfriadoras presenta una temperatura de 55 - 60°C.

El azúcar seco se transporta por medio de bandas hasta las tolvas de alimentación de las diferentes envasadoras. Cada tolva alimenta una báscula electrónica que pesa y envasa el azúcar. Las básculas emplean un sistema computarizado el cual permanentemente monitorea el peso del azúcar. Dependiendo de la línea de producción se emplean diferentes tipos de empaques. Los sacos y bolsas son cerrados y se llevan a la bodega para su despacho al comercio.⁴

6.2 DEFINICION DE CALDERA

Una caldera o generador de vapor puede definirse como un equipo que, dentro de sus capacidades genera y entrega vapor en la cantidad, calidad y oportunidad requerida por el usuario final, en forma continua y en operación económica y segura. Las Calderas son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones en la industria. Según Bermudez⁵.

➤ **Clasificación De Las Calderas.** Las calderas pueden ser clasificadas según diferentes autores de acuerdo a numerosas variables, como lo son el tipo de combustible, el tipo de transmisión de calor (radiación, convección o mixtas), el tipo de operación (automáticas, semiautomáticas o de operación manual), según su presión de trabajo (baja (menores de 20 bar), media (20 a 64 bar) y alta (mayores de 64 bar), calderas de recuperación de calor etc.; pero realmente las calderas se clasifican según la disposición de los fluidos en **Acuotubulares** (tubos de aguas) y **Pirotubulares** (tubos de gases), y las variables anteriores son condiciones de construcción y operación de estos dos tipos de generadores de vapor. Según Borroto⁶.

En este trabajo se profundizara en las calderas acuotubulares, ya que las calderas que componen el sistema de generación de vapor de Incauca S.A. son de este tipo, pero sin dejar de explicar algunas de las características importantes de las calderas Pirotubulares.

⁴ Manual de Procesos División Elaboración. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. h 2.

⁵ BERMUDEZ, Edgar. Eficiencia de la Caldera Pirutubular Colmaquinas de 250 BHP de un Laboratorio farmacéutico. Santiago de Cali, 2005. p 19. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería.

⁶ BORROTO, Aníbal. Ahorro de Energía en Sistemas de Vapor. Cuba: Universidad de Cienfuegos, 2002 p. 8.

6.3 CALDERAS PIROTUBULARES

➤ **Descripción.** Se denominan pirotubulares por ser los gases calientes procedentes de la combustión de un combustible, los que circulan por el interior de tubos cuyo exterior esta bañado por el agua de la caldera.

El combustible se quema en un hogar, en donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación, y los gases resultantes, se les hace circular a través de los tubos que constituyen el haz tubular de la caldera, y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección. Según sea una o varias las veces que los gases pasan a través del haz tubular, se tienen las calderas de uno o de varios pasos. En el caso de calderas de varios pasos, en cada uno de ellos, los humos solo atraviesan un determinado número de tubos, cosa que se logra mediante las denominadas cámaras de humos. Una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea. Según Lifschitz⁷.

Figura 2. Esquema Caldera Pirotubular



Fuente: INDUSTRIAS INAROCA. Esquema Caldera Pirotubular [en línea]. Venezuela: Industrias Inaroca, 2008. [Consultado 14 Abril de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.inaroca.com.ve/Productos0202.htm>

➤ **Componentes Principales De Una Caldera Pirotubular.** Las partes principales de una caldera pirotubular son:

- **Hogar:** Lugar donde se realiza la combustión.

⁷ LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: AADECA, 1993. [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php

- **Superficie de calentamiento:** Compuesto por los sitios donde se realiza el intercambio de calor.
- **Carcasa:** Cubierta o envoltura exterior.
- **Espejos:** Tapas laterales.
- **Chimenea:** Conducto de salida de los gases
- **Quemadores:** Equipo que realiza la mezcla y quemado para combustibles líquidos y gaseosos.
- **Sopladores:** Ventiladores de aire.
- **Bomba de alimentación:** Suministra el agua que alimenta la caldera.
- **Sistema de regulación y control:** Controla y mantiene las variables en valores admisibles para el buen funcionamiento.
- **Bomba de combustible:** Suministra el combustible líquido con la presión necesaria para una perfecta combustión.
- **Válvula de seguridad:** Válvula que se encarga de liberar vapor cuando la caldera sobrepasa los valores de presión permitidos.
- **Refractario:** Aislante térmico utilizado para disminuir las pérdidas de calor al medio ambiente.

Figura 3. Caldera Piro-tubular Industrial



Fuente: INDUSTRIAS INAROCA. Caldera Piro-tubular 300 BHP [en línea]. Venezuela: Industrias Inaroca, 2008. [Consultado 14 Abril de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.inaroca.com.ve/Productos0203.htm>

6.4 CALDERAS ACUOTUBULARES

➤ **Descripción.** En estas calderas, al contrario de lo que ocurre en las piro-tubulares, es el agua el que circula por el interior de tubos que conforman un circuito cerrado a través de la superficie de intercambio de calor de la caldera.

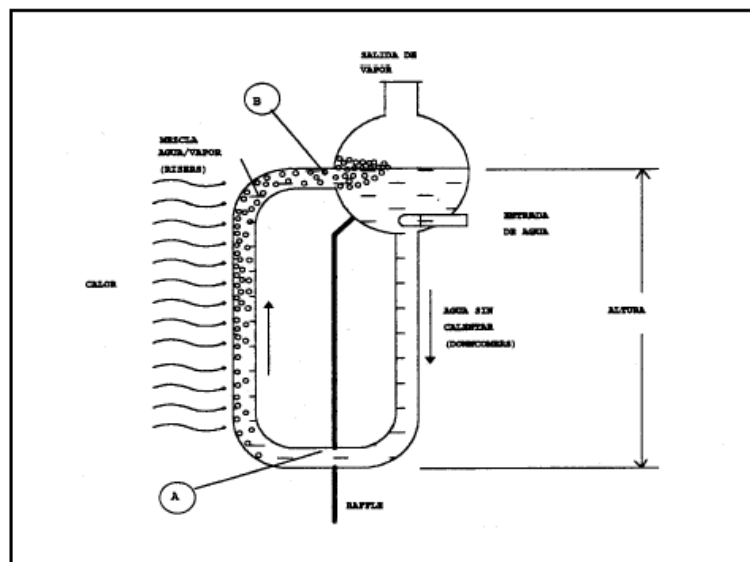
Adicionalmente, pueden estar dotadas de otros elementos de intercambio de calor, como pueden ser el sobrecalentador, recalentador, economizador, etc.

Estas calderas, constan de un hogar configurado por tubos de agua, tubos y refractario, o solamente refractario, en el cual se produce la combustión del combustible y constituyendo la zona de radiación de la caldera.

Desde dicho hogar, los gases calientes resultantes de la combustión son conducidos a través del circuito de la caldera, configurado este por paneles de tubos y constituyendo la zona de convección de la caldera. Finalmente, los gases son enviados a la atmósfera a través de la chimenea.

Estas calderas tienen un gran espectro de producción de vapor que puede variar desde una pequeña producción, en calderas compactas, hasta las grandes producciones de 1000 ton/hora y presiones hasta 150 kg/ cm² como es el caso de las centrales termoeléctricas. Según Lifschitz⁸.

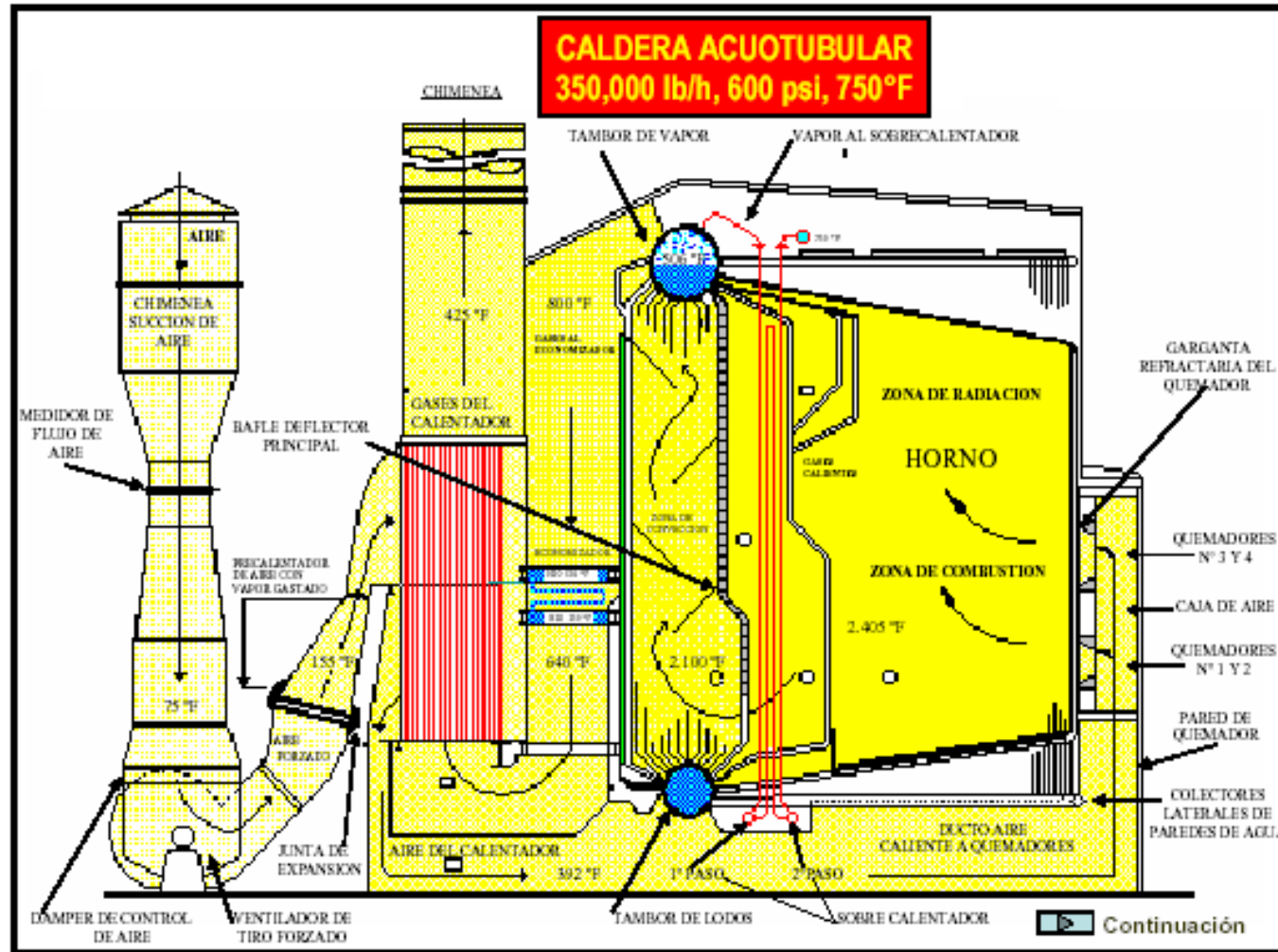
Figura 4. Principio De Funcionamiento De Una Caldera Acuotubular



Fuente: LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: AADECA, 1993 [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: [http:// www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php](http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php); p. 18.

⁸ Ibíd., Disponible en Internet: [http:// www. aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php](http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php)

Figura 5. Esquema Caldera Acuotubular



Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 11.

➤ **Componentes Principales De Una Caldera Acuotubular.** A continuación se describirán las partes principales de una caldera acuotubular:

- ❖ Horno
- ❖ Quemadores
- ❖ Superficies de Calentamiento
 - Paredes de agua
 - Superficie de caldera
 - Sobrecalentador
 - Economizador
 - Calentador de aire
- ❖ Domo
- ❖ Bomba de alimentación
- ❖ Sistemas de tiro
 - Ventilador de tiro forzado
 - Ventilador de tiro inducido
 - Chimenea
- ❖ Cimentación y soporte
- ❖ Refractarios
- ❖ Instrumentos y controles automáticos
- ❖ Accesorios de caldera

Se detallaran algunos de los componentes y circuitos más importantes que componen a este tipo de caldera. También se mencionaran los factores más importantes que inciden directamente sobre su funcionamiento.

• **Domo Superior.** El domo superior cumple con las siguientes funciones:

√ Proveer el espacio físico para producir la separación de fase entre la mezcla agua y vapor.

√ Proveer el espacio físico para alojar todos los elementos de separación necesarios (separadores ciclónicos, separadores primarios, secundarios, etc.) a fin de garantizar la correcta separación de las partículas de agua y sólidos en suspensión de la corriente de vapor.

√ Proveer un reservorio con el fin de absorber las variaciones del nivel durante los transitorios.

√ Calentamiento del agua de alimentación que ingresa.

√ Proveer el espacio físico necesario en donde se pueda mezclar el agua de caldera con productos químicos.

✓ Proveer el espacio físico necesario en donde se pueda efectuar el purgado del agua de caldera.

✓ Vinculo de anclaje mecánico para todos los tubos que ingresan a él.

- **Superficies De Calefaccion.** Se definen como superficies de calefacción a aquellas superficies de transferencia de calor que son bañadas por los gases de la combustión de un lado y por el agua o vapor o aire por el otro, logrando el intercambio de calor entre los gases y las sustancias de trabajo.

Las superficies de calentamiento están conformadas por regla general por haces de tubos, cuya forma y disposición dependen del diseño y capacidad de la caldera, así como de su presión de trabajo.

- **Haz Convectivo.** El haz convectivo es el sector en donde se lleva a cabo gran parte de la transformación de agua en vapor. Esto implica que la temperatura de la mezcla agua/vapor que circula dentro de sus tubos, es la correspondiente a la de saturación a la presión del domo. En esta sección, la forma de transferencia de calor que predomina es la convección, pues los gases transfieren su calor progresivamente por **convección** en la medida que atraviesan las sucesivas filas de tubos. Para aquellas calderas provistas de sobrecalentador, es común que este último se encuentre protegido por una pantalla de tubos perteneciente al haz convectivo. Esta pantalla protege al sobrecalentador de las altas temperaturas de metal como así también del ensuciamiento.

- **Hogar.** El medio de transferencia de calor que caracteriza a este sector es, sin lugar a dudas, la **radiación**. Este recinto se caracteriza por el hecho de tener la mayor superficie expuesta posible a la radiación luminosa.

Es netamente un recinto delimitado por paredes, techo y piso de agua. Estas últimas están compuestas por tubos unidos entre sí por una membrana metálica, más conocidos como paredes membrana o paredes de agua. En ellas, a igual que en el haz convectivo, es en donde se produce el cambio de estado agua en vapor, o sea que la temperatura de la mezcla que circula dentro de éstos, es la correspondiente a la de saturación a la presión del domo.

Las tres funciones más importantes que tiene un hogar desde el punto de vista de la combustión son:

✓ Proveer el espacio necesario para acomodar la llama, sin que ésta toque los tubos. De no evitar esto, se corre el riesgo de la extinción anticipada de los extremos de la llama que entran en contacto con los tubos, ya que estos últimos están a mucha menor temperatura que la llama. Este fenómeno se exterioriza mediante la emisión de humos, producto de una combustión incompleta.

✓ Mantener la temperatura de la llama y de los gases lo más alta posible durante el tiempo necesario con la finalidad de que la combustión se complete sin humos ó cenizas.

✓ Proveer un recinto hermético que evite las fugas de gases (hogar presurizado) ó entrada de aire ajeno a la combustión (hogar sub presurizado).

• **Sobrecalentador.** La función del sobrecalentador es la de elevar la temperatura de vapor por encima de la de saturación a la presión de domo. Existen varios motivos para realizar esto:

✓ Una ventaja se debe a la ganancia termodinámica que implica trabajar con un fluido con mayor entalpía. Dicha ganancia atribuible al aumento de entalpía es de aproximadamente un 3 % por cada 50°C de sobrecalentado, dependiendo esto último de la presión y de la temperatura.

✓ Si el vapor ha de ser utilizado para alimentación de máquinas rotantes, es indispensable asegurar el secado total de este antes de ingresar a la turbina. Además, el vapor sobrecalentado posee mucha menor tendencia a condensarse en las últimas etapas de la turbina que utilizando vapor saturado.

Los sobrecalentadores pueden clasificarse en dos grandes grupos que dependen de las ubicaciones de estos dentro de la caldera y de cómo están diseñados. Estos grupos se pueden clasificar en: **Convectivos, radiantes o la combinación de ambos.** Es importante esta clasificación, pues el comportamiento de la temperatura del vapor en función del estado de carga de la caldera, es sustancialmente diferente.

- Sobrecalentadores Convectivos: Estos sobrecalentadores están ubicados dentro de la zona convectiva de la caldera y en consecuencia no están expuestos a la radiación directa. Se caracterizan por estar compuestos por varias filas de serpentinas una detrás de la otra, de manera tal que los gases transfieran su calor progresivamente a medida que pasan a través de ellas. **En este tipo de sección, la temperatura del vapor aumenta a medida que el estado de carga lo hace.** Este fenómeno se debe en gran parte a que el flujo másico de gases aumenta con mayor intensidad que el flujo másico del vapor que circula dentro de los tubos y por otro lado existe una mejora en los coeficientes de transferencia de calor, debido a los aumentos de estos flujos.

- Sobrecalentadores Radiantes: Estos sobrecalentadores están ubicados en el hogar, de manera tal que están expuestos directamente a la radiación. Se caracterizan por estar compuestos de una serpentina totalmente plana, cuya superficie está expuesta a la radiación luminosa. **En este tipo de**

sobrecalentador, la temperatura del vapor disminuye a medida que aumenta el estado de carga de la caldera.

Esto último se debe al aumento del índice de absorción de las paredes de agua del hogar a medida que la carga de la caldera aumenta, dejando cada vez menos calor disponible para este tipo de sobrecalentador.

- Sobrecalentadores Radiantes/Convectivos: Estos sobrecalentadores utilizan la combinación de ambos tipos de superficie, (radiantes y convectivas), por lo que la curva característica temperatura de vapor versus estado de carga resultante, es en realidad una composición de sus respectivas curvas. La particularidad de esta superficie es la de mantener la temperatura del vapor prácticamente constante a través de un amplio rango de carga de la caldera. Esto reduce y en algunos casos elimina la necesidad de atemperación, facilitando de este modo el control de la temperatura.

- **Circuito De Agua.** El agua es suministrada al generador de vapor por la bomba de agua de alimentar. El agua circula por el economizador, pasa al domo y pasa desde este por los tubos descendentes a los colectores inferiores o al domo inferior, de donde se alimentan las paredes de agua o los tubos ascendentes o evaporadores, en los cuales se forma la mezcla de agua vapor. Esta mezcla se descarga en el domo que tiene como función separar el agua del vapor, el agua que no se convierte en vapor baja por tubos descendentes conjuntamente con el agua de alimentación y se repite el ciclo.

- **Economizador.** Tiene como función incrementar la temperatura del agua de alimentación hasta una temperatura inferior a la de saturación (existen también economizadores evaporativos).Según Borroto⁹.

- **Atemperación.** Básicamente consta de un sistema cuya finalidad es la de bajar la temperatura del vapor hasta los valores deseados.

Existen varios métodos que permiten lograr estos la atemperación:

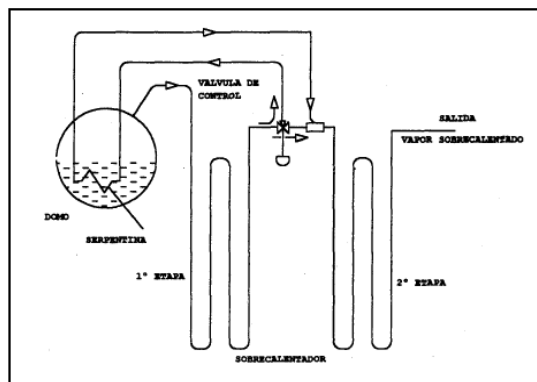
- Atemperación Indirecta: La atemperación indirecta del vapor sobrecalentado se basa en producir modificaciones de las condiciones lado gases. Una forma de reducir la temperatura del vapor es aumentando el aire primario o sea el exceso de aire en la combustión ó diluyendo con aire secundario lo que provoca un enfriamiento de estos. Estos métodos no son aconsejables pues atentan contra la eficiencia de la unidad, ya que gran parte del calor se transfiere al aire en exceso y no cumple ningún papel en la combustión.

⁹ BORROTO, Op. Cit., p. 26

- **Atemperación Directa:** Este método se basa en la disminución de la temperatura del vapor sobrecalentado por medio del intercambio térmico por **contacto directo o indirecto** del vapor con otro fluido de menor temperatura.

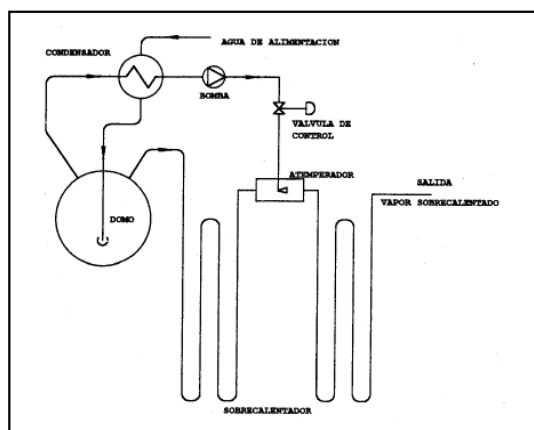
Uno de los métodos utilizados de **contacto indirecto**, se basa en el intercambio indirecto de calor proveniente de una parte del vapor sobrecalentado con el agua de domo. Este método contempla el uso de una válvula de tres vías que desvía parte del vapor del sobrecalentador, proveniente de una primera etapa del sobrecalentador, hacia una serpentina sumergida dentro del domo.

Figura 6. Atemperación Directa Por Contacto Indirecto



Fuente: LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: AADECA, 1993 [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: [http:// www. aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php](http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php); p. 30.

Figura 7. Atemperación Directa Por Inyección De Agua



Fuente: LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: AADECA, 1993 [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: [http:// www. aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php](http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php); p. 32.

- **Purga Continua.** Por último, mediante la extracción continua de una determinada proporción de agua de domo, se logra reducir la concentración de sólidos en este medio. La cantidad de agua de la purga continua puede inferirse y controlarse automáticamente mediante la medición de la conductividad de agua en el domo (medida en ppm), controlando de este modo la cantidad de agua a purgar mediante el uso de una válvula de control.

- **Circuito De Gases.** Para mantener la combustión y lograr la transferencia del calor liberado en ella a la sustancia de trabajo, es necesario extraer los productos de combustión del horno, y luego hacerlos circular a través de las diferentes superficies de calentamiento. Esta corriente de los gases es originada por la diferencia de presiones entre el horno y el punto de escape de los gases de la caldera creada por el ventilador de tiro inducido y/o el tiro natural de la chimenea.

El recorrido de los gases comienza en el horno, prosigue por la superficie evaporativa o superficie de la caldera, el sobrecalentador, economizador y calentador de aire hasta llegar a la chimenea para ser descargados a la atmosfera. Durante todo su recorrido los gases transfieren su calor al agua, vapor y aire en cada uno de los equipos.

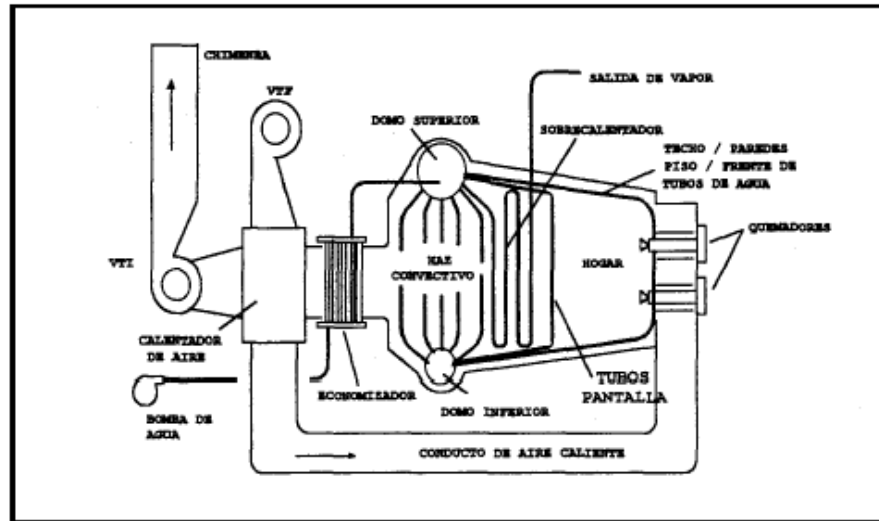
- **Calentador De Aire.** Es el equipo que permite la recuperación parcial de calor sensible en los gases de la combustión, todavía caliente cuando van a la chimenea. Este calor es recibido por el aire que se emplea en la combustión del horno.

- **Tiro Natural.** Es el vacío que se crea en el hogar de la caldera, cuando los gases de la combustión son evacuados por la chimenea. Debido a que los gases de combustión se encuentran calientes, el peso de la columna gaseosa así formado, es menor al peso de la misma altura de aire ambiente. La circulación de los gases se origina debido a las diferencias de densidades. Con el tiro natural se evacuan los gases de la combustión.

- **Tiro Forzado (Tiro Mecánico).** Es el aire que se induce al hogar de la caldera mediante un ventilador. También se conoce como aire primario de la caldera, entra por debajo de la parrilla para acelerar la combustión. El ventilador, toma aire de la atmósfera y lo pasa a través del calentador de aire efectuando así dos funciones: calentamiento del aire forzado y refrigeración del calentador.

- **Tiro Inducido.** Es el vacío generado por el ventilador en el hogar de la caldera. Es el encargado de evacuar los gases de la combustión.

Figura 8. Ubicación Componentes Caldera Acuotubular



Fuente: LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: AADECA, 1993 [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php; p. 23.

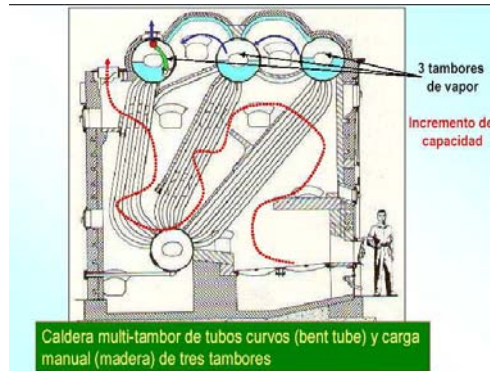
• **Tendencias actuales en el desarrollo de los generadores de vapor industriales.**

- Eficiencia (mantenida a cargas parciales)
- Confiabilidad
- Costo
- Impacto ambiental
- Flexibilidad de combustibles
- Aplicación en sistemas de cogeneración
- Parámetros de vapor: presión: 9 a 80 Kgf/cm²
- Temperatura: Saturado hasta 10 Kgf/cm², sobrecalentado con temperaturas entre 180-510°C.
- Reducción del periodo entre proyecto y puesta en marcha
- Calderas compactas ensambladas en fabrica (combustible liquido o gaseoso)
- Piro-tubulares: Hasta 20-25 Ton/h
- Acuotubulares: Hasta 100 Ton/h
- Calderas pre – ensambladas (componentes modulares)
- Uso De calderas piro-tubulares en procesos de calentamiento, baja presión y capacidad.
- Uso de calderas acuotubulares de tipo radiante para presiones entre 70 y 80 kgf/cm².
- Uso de hornos de lecho fluidizado para combustibles sólidos.
- Mayor empleo de superficies recuperativas.
- Quemadores de bajo Nox.

- **Clasificación De Calderas Acuotubulares Según Sus Domos**

- Caldera Acuotubular Multitambores de Vapor

Figura 9. Caldera Acuotubular Multitambores De Vapor



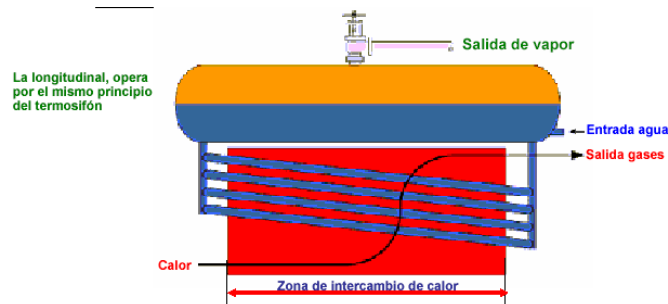
Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007 Diapositiva 4.

⇒ Ventajas: Incremento de capacidad de generación de generación del vapor.

⇒ Desventajas: Las limitaciones de estas calderas es el espacio que ocupan y el potencial de daño por cambios de carga y reducciones de eficiencia por los varios caminos de circulación natural

- Caldera Acuotubular de Tambor Longitudinal

Figura 10. Caldera Acuotubular De Tambor Longitudinal



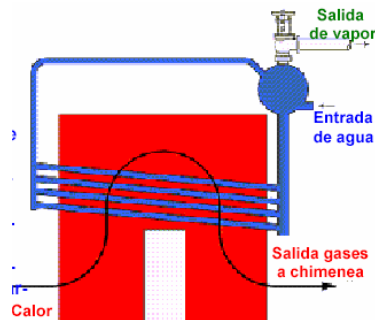
Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 31.

El agua “fría” entra al tambor longitudinal sobre la fuente de calor, y cae en un cabezal iniciando circulación en los tubos calientes inclinados. Cuando la temperatura del agua aumenta, circula por los tubos, hierve y baja su densidad, produciendo circulación de agua-vapor por los tubos inclinados del cabezal frontal, descargando al tambor de vapor. Allí las burbujas de vapor, se separan del agua y el vapor sale.

Las capacidades típicas para calderas de tambores longitudinales, son del orden de 2,250 kg/h a 36,000 kg/h.

- Caldera Acuotubular De Tambor Cruzado

Figura 11. Caldera Acuotubular De Tambor Cruzado



Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 32.

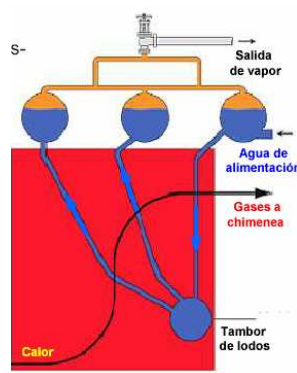
El tipo cruzado, es una variante de la longitudinal, el tambor de vapor se cruza a la fuente de calor. Opera por el mismo principio que el longitudinal, excepto que en este hay más uniformidad de temperatura a través del tambor de vapor. Tiene riesgo de daño cuando falla la circulación por los tubos superiores, a altas cargas de producción de vapor, secándose y sobrecalentándose con eventual falla.

Este tipo tiene la ventaja de ser capaz de servir un gran número de tubos inclinados debido a su posición cruzada.

La capacidad típica de esta caldera está en el rango de 700 a 240,000 kg/h.

- Caldera Acuotubular Tipo Stirling O De Tubos Doblados

Figura 12. Caldera Acuotubular Tipo Stirling O De Tubos Doblados



Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 33.

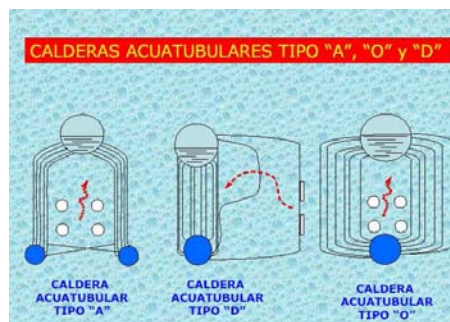
Este tipo de caldera es un desarrollo adicional de las calderas acuotubulares. Opera por el mismo principio de temperatura y densidad del agua.

Utiliza 3 tambores de vapor y uno de lodos. El agua “fría” de alimentación entra por el tambor superior de la derecha donde ésta cae por mayor densidad al tambor de lodos. El alto calor en la zona de tubos, hace que la fría empuje al agua caliente y las burbujas suben a los dos tambores conectados, donde el vapor generado sale de la caldera.

Esta caldera permite una gran superficie de transferencia de calor y promueve la circulación natural del agua.

- Calderas Acuotubulares Tipo “A”, “O” Y “D”

Figura 13. Calderas Acuotubular Tipo A, O Y D



Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 38.

Ventajas:

- ⇒ Alojan poca agua dentro de su estructura y responden rápidamente a los cambios de carga y entradas de calor.
- ⇒ Los tubos de pequeño diámetro y el tambor cilíndrico de vapor, significan altas presiones de vapor que pueden tolerar y hasta de 160 bar (2,320 psi).
- ⇒ El diseño puede incluir varios quemadores en cualquiera de las paredes, dando opciones de combustión vertical u horizontal y facilidad de control de temperatura en varios sitios de la caldera. Esto es importante si la caldera tiene sobrecalentador, ya que la temperatura del vapor debe ser controlada.

Desventajas:

- ⇒ No son simples para hacer como las tipo paquete o las pirotubulares, por lo que se requiere trabajo de campo en el sitio del montaje.
- ⇒ La opción de múltiples quemadores puede dar gran flexibilidad, pero 30 o mas quemadores usados, requerirán un sistema complejo de control.

Figura 14. Caldera Acuotubular Industrial



Fuente: RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. Diapositiva 13.

7 SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR DE INCAUCA S.A.

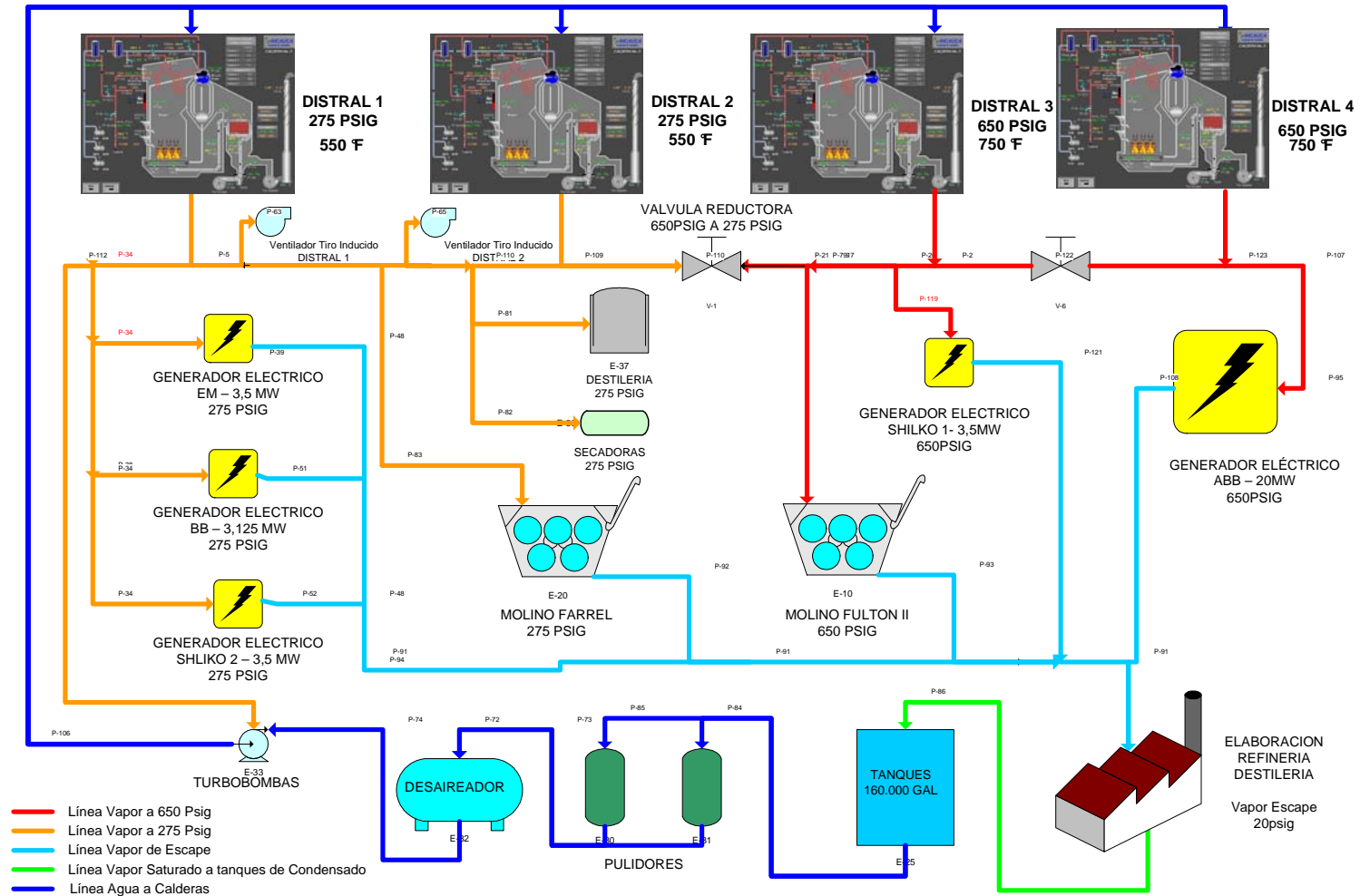
El sistema de generación de Vapor se encuentra conformado por la planta de tratamiento de aguas de alimentación de las calderas y por 4 calderas acuotubulares tipo D que distribuyen el vapor de la siguiente manera:

- Las calderas Distral 1 y 2 alimentan principalmente el molino Farrell a 275 Psig para la molienda de caña de azúcar y a tres turbinas para mover tres generadores de energía eléctrica llamados EM de 3.5 MW, el BB de 3,125 MW y el Shilko 2 de 3.5 MW. Además parte del vapor se utiliza en la Destilería y en Secadoras de la parte de refinería de azúcar.
- La caldera Distral 3 alimenta el molino Fulton II a 650 Psig para la molienda de caña de azúcar y la turbina del generador de energía eléctrica llamado Shilko 1 de 3,5 MW.
- La caldera Distral 4 alimenta a 650 Psig la turbina del generador de energía eléctrica llamado ABB de 20 MW.

Todas estas son condiciones de funcionamiento en operación normal, pero en caso de ser necesario la línea de 650 Psig de las calderas 3 y 4 pueden suplir de vapor a la línea de 275 Psig de las calderas 1 y 2 mediante una válvula reductora. Igualmente la caldera 3 puede suministrarle vapor al generador ABB si es necesario y la caldera cuatro puede alimentar el molino Fulton II y el generador Shilko I en cualquier momento que ocurra una eventualidad fuera de lo normal.¹⁰

¹⁰ R611001 Proceso Generación de Vapor. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. 3h.

Figura 15. Sistema De Vapor De Incauca S.A.



El sistema de generación de vapor de Incauca S.A. posee cuatro calderas acuotubulares tipo D, las cuales se diferencian en la capacidad de generación de vapor, el consumo y el tipo de combustible y en la utilización de sus ventiladores. Las calderas poseen los mismos sistemas de extracción de cenizas a excepción de la caldera 4 a la cual se le instaló adicionalmente un precipitador electrostático de ceniza. A pesar de estas diferencias, el principio de funcionamiento es exactamente el mismo para todas estas.

7.1 VENTILADORES INSTALADOS

♦ **Tiro Forzado:** El aire de combustión es tomado de la atmósfera por el ventilador de tiro forzado, el cual lo envía al calentador tubular de aire en donde se calienta a 444 °F, aprovechando el calor de los gases de escape.

En el calentador los gases van por el interior de tubos y el aire circula por el exterior. El calentador es de dos pasos en el lado de aire y un paso en el lado de gases. El aire se distribuye de la siguiente manera:

- **Aire Primario:** Es el que se suministra por debajo de las parrillas por medio de un ventilador.

- **Sobre Fuego de Bagazo:** Es el aire tomado de la atmósfera por medio de un ventilador. En las calderas Distral 1 y 2 el aire entra a temperatura ambiente; para las calderas Distral 3 y 4 el aire entra después de haber pasado por el calentador.

La función principal del aire es suministrar el Oxígeno requerido para la combustión y formar la turbulencia en el hogar para obtener combustión completa. Si se logra obtener una combustión completa (estequiométrica) en el hogar de la caldera todo el combustible se quemaría.

♦ **Sobre Fuego de Carbón:** Sólo aplica para las calderas Distral 3 y 4. Es el aire frío tomado de la atmósfera por un ventilador eléctrico, el cual se divide en dos partes:

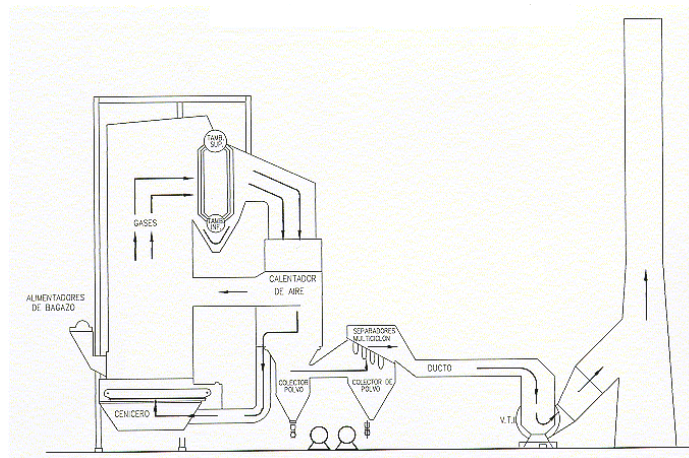
- **Sobre fuego:** El aire que entra por la parte delantera y posterior de la caldera para formar una turbulencia en el hogar y quemar las partículas que se encuentran en suspensión, retirar la humedad existente en el carbón y continuar su combustión. Sirve también para refrigerar las paredes de agua.

- **Reinyección de Cenizas:** Para reinyectar al hogar de la caldera todas las partículas que han sido arrastradas por la corriente de gases y que tengan poder combustible para acabarlas de quemar.

♦ **Distribuidor de Bagazo:** Es el aire frío inyectado en los patines alimentadores de bagazo, encargado de dispersar el bagazo sobre la parrilla, aplica en las 4 calderas.

♦ **Aire Terciario:** Se suministra a temperatura ambiente y es distribuido a través de boquillas en las dos paredes laterales y la pared frontal del hogar en las calderas Distral 1 y 2, a una presión de descarga de 20 pulgadas de agua.

Figura 16. Esquema General. Calderas Acuotubulares Tipo D Incauca S.A.



Fuente: R611001 Proceso Generación de Vapor. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. 26h.

Figura 17. Calderas Sistema De Vapor De Incauca S.A.



7.2 PARAMETROS DE DISEÑO

Tabla 1. Análisis Último De Combustibles

ANALISIS PROXIMO	CARBON % PESO	BAGAZO % PESO
Carbón fijo	56.38	22.65
Hidrogeno	3.07	2.9
Oxigeno	4.35	20.20
Humedad	4.0	50.00
Nitrógeno	1.2	0.20
Azufre	2.57	0.05
Ceniza	25.0	4.0
Poder Calórico (Btu/Lb)	11600	4100

Fuente: R611001 Proceso Generación de Vapor. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. 15h.

Los cálculos de diseño de cada una de las calderas fueron hechos para quemar bagazo o carbón sin mezclarlos. Pero en la actualidad solo queman bagazo las calderas Distral 1 y 2; las calderas Distral 3 y 4 queman una combinación de bagazo con carbón y bagacillo. El bagacillo hay que considerarlo como un combustible adicional ya que tiene propiedades físicas y químicas totalmente distintas al carbón y al bagazo.

Tabla 2. Parámetros De Diseño Calderas Distral 1, 2, 3 Y 4

VARIABLE CONTROLADA	UNIDAD	CALDERA DISTRAL 3		CALDERA DISTRAL 4		CALDERA DISTRAL 1	CALDERA DISTRAL 2
COMBUSTIBLE		CARBON	BAGAZO	CARBON	BAGAZO	BAGAZO	BAGAZO
VAPOR SOBRECALIENT.	<u>lb/hr</u>	200.000	200.000	300.000	300.000	150.000	150.000
PRESION SOBRECALIENT.	<u>Psig</u>	650	650	650	650	275	275
TEMPER. SOBRECALIENT.	<u>°F</u>	750	750	750	750	520	520
PRESION DOMO	<u>Psig</u>	710	710	714	714	302	302
EXCESO DE AIRE	%	30	30	30	30	30	30
AIRE ENT. CAL. AIRE	<u>Klb/hr</u>	243,78	300,83	321,5	433,2	177,41	177,41
AIRE ENT. CALDERA	<u>Klb/hr</u>	279,375	315,424	419,062	473,116	177,1	177,1
TEMPERATURAS							
AGUA ALIMENTACION	<u>°F</u>	212	212	212	212	212	212
AIRE ENTR. UNIDAD	<u>°F</u>	80	80	80	80	80	80
AIRE SAL. CAL. AIRE	<u>°F</u>	391	426	447	463	443	443
GAS SAL. DEL HOGAR	<u>°F</u>	680	750	680	750	620	620
GAS SALIDA CALDERA	<u>°F</u>	628	656	653	682	663	663
GAS SALIDA CAL. AIRE	<u>°F</u>	391	426	447	463	476	476
CONSUMO COMBUSTIBLE	<u>lb/hr</u>	31.645	88.707	45.521	131.502	64.000	64.000
PERDIDAS DE CALOR							
Gas Seco	%	7,26	7,61	7,26	7,96	8,37	8,37
H ₂ y humedad Combustible	%	3,80	22,36	4,09	22,49	22,79	22,79
Humedad Aire	%	0,18	0,18	0,27	0,29	0,21	0,21
Combustible No quemado	%	9,25	1,31	6,61	1,42	3,75	3,75
Radiación	%	0,37	0,37	0,32	0,32	0,41	0,41
Perdidas indeterminadas	%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
EFICIENCIA P.C.S.	%	77,64	66,67	79,95	66,02	62,97	62,97

Fuente: Manuales de Operación y Mantenimiento Calderas Distral 1- 4. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., 1982-1994: 4 V.

8 PROBLEMÁTICA SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE INCAUCA S.A.

8.1 FLUJO DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLES

Hasta la fecha no se cuenta con ningún sistema de medición de flujos de carbón, bagazo y bagacillo en las 4 calderas.

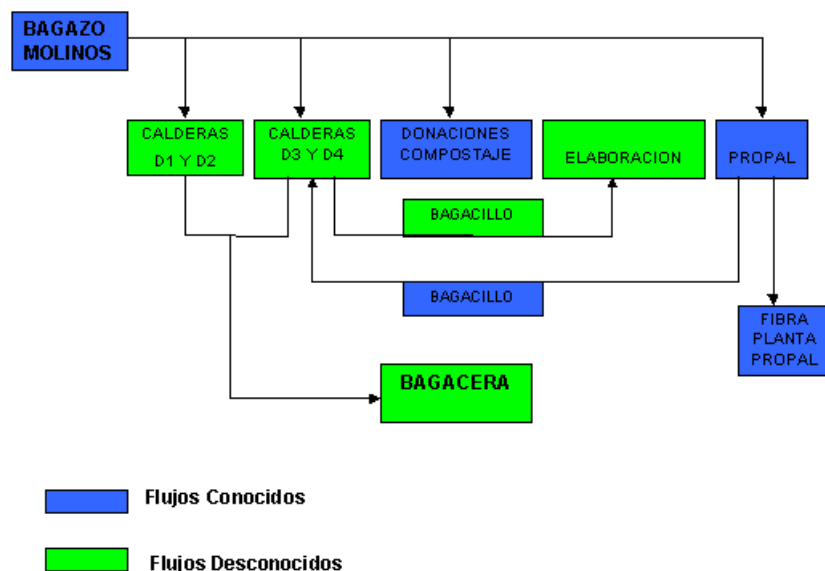
Para el carbón solo se pesa lo que entra diariamente a la bodega pero no hay control sobre lo que se quema en cada una de las calderas (Distral 3 y 4).

Para el bagazo se sabe cuando bagazo sale diariamente de los molinos, pero no se sabe cuando bagazo queman cada una de las calderas. Además no hay un dato medido de lo que se va almacenando en la bagacera.

El bagacillo que retorna la planta de desmedulado de bagazo de Propal se mide por medio de un Weightometro y la fibra se pesa en bascula, pero no se mide cuanto consumen las calderas Distral 3 y 4, lo que no consumen la calderas 3 y 4 va hacia elaboración (tampoco se mide) y el excedente va hacia la bagacera.

El bagazo y el bagacillo se distribuyen de la siguiente manera:

Figura 18. Distribución Del Bagazo En Incauca S.A.



8.2 CALCULO DE EFICIENCIAS

El sistema de generación de vapor no cuenta con un control constante en el cálculo de eficiencias. Los últimos cálculos de eficiencias se realizaron sin tener valores exactos de los flujos de combustibles hacia las calderas, no se tomaron análisis elementales, ni proximales de los combustibles tal y como se estaban quemando en el instante de la prueba, se tomaron datos reportados anteriormente.

Tampoco se tomo en cuenta el bagacillo como un combustible adicional. Además en la caldera Distral 4 no se tienen en cuenta los inquemados provenientes del precipitador electroestático y se obvian algunas perdidas de energía importantes.

Los resultados de estas mediciones fueron (valores en promedios):

Tabla 3. Ultimo Balance Térmico Calderas Incauca S.A.

VARIABLE CONTROLADA	UNIDAD	DISTRAL 1	DISTRAL 2	DISTRAL 3	DISTRAL 4
Tiempo Evaluación	Horas	3	3	3	3
Flujo Vapor	Lb/h	103.517	97.144	215.950	318.483
Temp.Vapor	°F	567	541,8	746	770,5
Presión Vapor	Psig	281	265,5	651,5	675
Temp. Ent. Calentador Aire	°F	80	83	80	81
Temp. Salida Calentador Aire	°F	420	390	400	511
Temp. Gases	°F	498	465	475	475
Hidráulico Bagazo	%	30	27	8	32,5
Alimentadores Carbón	%			95	100
Bagazo Alimentado	Ton	20.21	22.8	26	54,13
Carbón Alimentado	Ton			8.4	14
Ceniza Producida					
Banco	Ton	0.5472	0.6494	3.015	7
Inquemados Banco	%	25.92	30.56	11.78	0,2751
Multiciclones	Ton	1.228	1.475	1.662	1.8
Inque. Multiciclones	%	4.7	0.242	27.8	0,3134
ANALISIS BAGAZO					
Carbono	%	25,77	25,77	25,77	25,77
Hidrogeno	%	1,93	1,93	1,93	1,93
Nitrógeno	%	0,47	0,47	0,28	0,32
Azufre	%	0,01	0,01	0,01	0,01

Humedad	%	50,8	50,8	52,9	48,5
Cenizas	%	2,85	2,85	2,32	3,49
Oxígeno	%	18,17	18,17	16,79	19,98
Poder Calorífico	Btu/lb	3.645	3.645	3.448	3.732
ANALISIS CARBON					
Carbono	%			55,04	55,04
Hidrogeno	%			4,01	4,01
Nitrógeno	%			0,98	1,07
Azufre	%			2,8	1,83
Humedad	%			5,8	6,78
Cenizas	%			17,14	17,86
Oxígeno	%			14,23	13,41
Poder Calorífico	Btu/lb			11.093	11.045
GASES COMBUST.					
CO	%	0,2899	0,2899	0,0208	0,1305
CO2	%	14,866	14,866	10,52	12
O2	%	5,9	5,9	7,66	7,83
N2	%	78,94	78,94	81,799	80,03
PERDIDAS TERMICAS					
Humedad Comb.	Btu/lb	655,52	655,52	496,61	459,20
Comb. Hidrogeno	Btu/lb	224,14	224,14	263,20	273,40
Gas Seco	Btu/lb	469,69	469,69	602,96	647,03
Inquemados	Btu/lb	107,37	107,37	317,73	279,64
Radiación	Btu/lb	21,41	21,41	20,19	22,65
Indeterminadas	Btu/lb	54,67	54,67	79,72	84,95
Exceso de Aire	%	34,75	34,75	58,67	61,27
Eficiencia	%	57,95	57,95	66,5	68,8

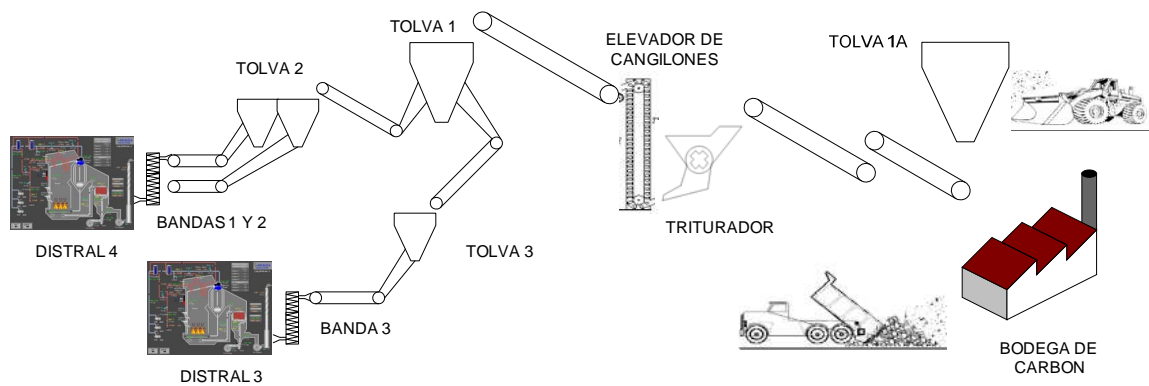
Fuente: R611001 Proceso Generación de Vapor. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. 45h.

9 CALCULO DEL FLUJO DE COMBUSTIBLES

9.1 CARBON

El esquema de alimentación de carbón hacia las calderas es el siguiente:

Figura 19. Esquema Manejo De Carbón De Incauca S.A.



El carbón suministrado por las minas de carbón circundantes del Valle del Cauca es transportado mediante volquetas y el de las minas provenientes de zonas mas alejadas del ingenio como los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y Boyacá en tracto mulas hasta las instalaciones del ingenio, se almacena en la bodega de carbón cuya capacidad es de aproximadamente 2000 Ton, de ahí se alimenta con un cargador (VOLVO) la tolva 1A, desde donde es transportado de dos bandas transportadoras en serie lo llevan a la zaranda, en esta se separan los finos y el resto del material llega a la trituradora (el carbón llega con una granulometría entre 0 -400 mm y sale con una granulometría entre 0 y 32 mm), en la descarga de la trituradora se une con los finos de la zaranda y alimentan el elevador de cangilones, que a su vez alimenta una banda transportadora la cual entrega a una tolva central que distribuye a dos tolvas de cada una de las calderas respectivamente Distral3 y Distral 4. En la Distral 4 la caldera se alimenta por medio de dos bandas transportadoras (No. 1 y No.2) las cuales llevan el carbón hacia un transportador tornillo sin fin el cual distribuye el carbón entre 7 alimentadores tipo basculantes. En la Distral 3 a diferencia de la Distral 4 se alimenta por medio de una sola banda transportadora (No.3) la lleva el carbón hacia un tornillo sin fin el cual la distribuye entre 5 alimentadores tipo basculantes.

9.1.1 Método De Medición De Consumo De Carbón En Calderas. Basándose en el funcionamiento de los weightometros¹¹ (Ver Anexo A), se implemento el siguiente método para medir el consumo de carbón hacia las calderas Distral 3 y Distral 4:

- Determinación de la velocidad de las bandas de alimentación de carbón No. 1,2 y 3.
- Estas bandas no se encuentran en constante movimiento, ya que las calderas regulan sus variables de operación como los son la presión y flujo de vapor sobrecalentado, presión de hogar, etc. Por medio de la alimentación de combustibles, por lo que se debe determinar el tiempo de trabajo de cada banda.
- Determinación de la cantidad de carbón alojado en un metro de la banda, en cada una de las 3 bandas. Este dato varía proporcionalmente de acuerdo a la humedad que tenga el carbón, por lo que se debió realizar una tabla de factores de corrección por humedad.

Siendo el consumo de carbón determinado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{CARBON} = V_{BANDA} \left[\frac{m}{h} \right] * m_{CARBON} \left[\frac{Kg}{m_{CARBON}} \right] * T[h] = [Kg_{CARBON}] \quad - \quad \text{Ecuación 9.1}$$

- V_{BANDA} - Velocidad de la banda
 m_{CARBON} - Kilogramos de carbón en cada metro de banda
 T - Tiempo de trabajo de la banda (motor)

Utilizando esta metodología se hallaron los siguientes resultados:

9.1.2 Cálculo De La Velocidad De Las Bandas. Los motores que mueven las bandas No.1 y 2 de la caldera Distral 4 son asíncronos y poseen variadores de velocidad, los cuales varían la velocidad del motor de acuerdo a una determinada frecuencia aplicada a ellos. Inicialmente se realizaron tabulaciones de velocidad Vs. frecuencia manejando un rango estipulado por los operarios de un mínimo de 0Hz y un máximo de 60Hz.

Se realizaron pruebas de 24 horas, reportando los datos en formatos entregados a los operarios, en donde reportaron las variaciones de frecuencia, y por ende las

¹¹ STEINMEYER, Henry. Pesaje Dinámico en Transporte de Sólidos [en línea]. Chile: Electro Industria, 2008. [Consulta: 10 Marzo 2008]
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=264&rank=1>

variaciones de velocidad. Al realizar el calculo de consumos diarios se detectaron muchos errores ya que para tener un dato confiable los operarios debían anotar la hora exacta en que realizaban dichas variaciones, lo que incurría en un trabajo demasiado tedioso que interfería en su trabajo normal.

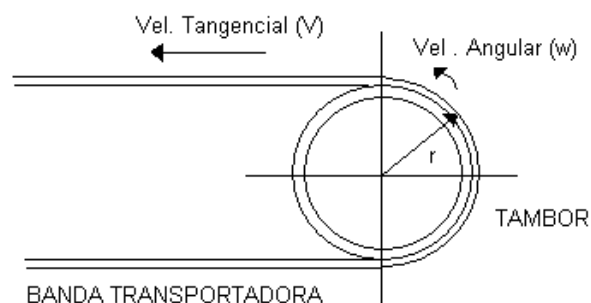
Debido a que el peso de carbón por metro de banda no era el mismo en la banda transportadora No. 2 que en la banda No. 1, se utilizaban dichos variadores de velocidad, para garantizar que cada banda trabajara a un velocidad dada que ambas alimentaran aproximadamente la misma cantidad de carbón a la caldera.

Para garantizar las condiciones de operación se consulto con cada uno de los operarios y se decidió dejar los variadores de velocidad bloqueados en las siguientes frecuencias con sus respectivas velocidades:

Tabla 4. Velocidad Bandas Alimentación Carbón Distral 4

	BANDA No. 1	BANDA No. 2	BANDA No. 3
Velocidad Angular (ω)	12,2 r.p.m	6,5 r.p.m	20,5 r.p.m
Velocidad Angular (ω)	1,278 rad/s	0,681 rad/s	2,147 rad/s
Radio tambor (r)	0,206 m	0,206 m	0,206 m
Frecuencia	37Hz	21,2Hz	21,2Hz
Velocidad Tangencial (V)	945.154 m/h	503.566 m/h	1588.169 m/h

Figura 20. Esquema Bandas Transportadoras De Carbón



La banda No. 3 de la caldera Distral 3 siempre trabaja a una misma velocidad, no cuenta con variadores de velocidad.

9.1.3 Calculo Del Tiempo De Trabajo De Las Bandas. El tiempo de trabajo de cada banda depende del tiempo que trabaje cada motor, para lo que se instalaron instrumentos llamados Horometros, los cuales cuentan en minutos el tiempo entre cada arrancada y parada del motor.

Estos datos es reportado cada dos horas en formatos de operación llevados por los operarios y por diferencia entre datos hallamos el tiempo de trabajo en un rango de tiempo determinado.

Figura 21. Motores Bandas Transportadoras Distral 4



MOTOR BANDA No. 1

MOTOR BANDA No. 2



TOLVA ALIMENTACION DISTRAL 4

Figura 22. Alimentación De Carbón Distral 3



9.1.4 Cantidad De Carbón Por Metro De Banda Transportadora. En cada una de las bandas se peso el carbón alojado en un metro de ellas. Se realizaron 5 muestras por día durante 4 días, se encontraron los valores de peso promedio por día, y se les realizo prueba de humedad en el laboratorio para encontrar la relación de peso de carbón Vs. Humedad. De esta prueba se arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 5. Peso De Carbón Bandas Transportadoras – Corrección Por Humedad

	% HUMEDAD	PESO CARBON
BANDA No. 1	7,62	14.17
	10,38	14.82
	12,61	15.5
	13,23	16.03
BANDA No. 2	7,62	29.16
	10,38	29.81
	12,61	30.49
	13,23	31.42
BANDA No. 3	7,62	10.20
	10,38	10.85
	12,61	11.53
	13,23	12.46

Con estos valores se realizo en cada toma de datos la corrección por humedad del carbón con respecto al peso para cada toma de datos de consumo.

Figura 23. Banda De Carbón Distral 3

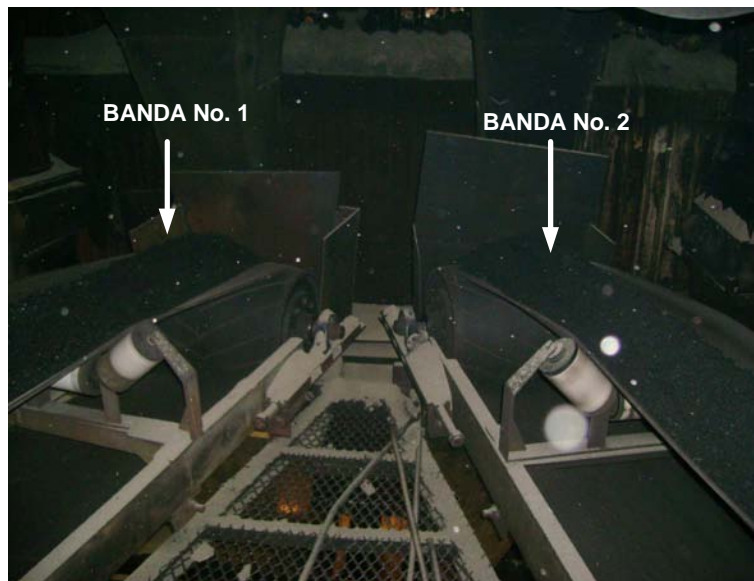


Figura 24. Aforo Másico De Bandas De Carbón



9.1.5 Balance De Masa Carbón. Aplicando la ecuación 9.1 se comenzó a realizar control sobre los consumos de carbón y el stock que debía quedar en la bodega diariamente, el balance es el siguiente:

$$\text{Stock Actual} = \text{Stock día Anterior} + \text{Carbón Recibido} - \text{Carbón Consumido}$$

Este balance se implemento desde el mes de Mayo de 2008 y hasta la fecha de la redacción de este documento se controla con el mismo sistema, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 6. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Mayo 2008



STOCK CARBONERA 08/05/08
1342,915

BALANCE CARBON DIARIO - MAYO

FECHA	CONSUMO D3 TON.	CONSUMO D4 TON.	TOTAL CONSUMIDO	CARBON RECIBIDO	CARBON CARBONERA x DIA	STOCK CARBONERA
01/05/2008	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	1342,915
02/05/2008	0,00	0,00	0,00	256,170	256,170	1599,085
03/05/2008	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	1599,085
04/05/2008	0,00	59,56	59,56	0,000	-59,560	1539,525
05/05/2008	42,54	102,85	145,39	135,905	-9,485	1530,040
06/05/2008	70,65	176,32	246,97	69,690	-177,280	1352,760
07/05/2008	90,58	173,20	263,78	211,280	-52,495	1300,265
08/05/2008	128,86	299,87	428,73	349,385	-79,345	1220,920
09/05/2008	153,23	326,21	479,44	607,670	128,230	1349,150
10/05/2008	131,26	304,32	435,58	510,765	75,185	1424,335
11/05/2008	176,56	318,65	495,21	77,005	-418,205	1006,130
12/05/2008	148,04	314,89	462,93	484,295	21,365	1027,495
13/05/2008	179,13	322,44	501,57	574,260	72,690	1100,185
14/05/2008	154,22	309,32	463,54	384,490	-79,050	1021,135
15/05/2008	177,09	310,62	487,71	523,815	36,105	1057,240
16/05/2008	161,85	315,00	476,85	409,765	-67,085	990,155
17/05/2008	184,56	320,26	504,82	212,765	-292,055	698,100
18/05/2008	160,52	312,98	473,50	157,965	-315,535	382,565
19/05/2008	142,18	316,54	458,72	377,870	-80,850	301,715
20/05/2008	160,77	310,89	471,66	449,270	-22,390	279,325
21/05/2008	158,09	313,32	471,41	426,915	-44,495	234,830
22/05/2008	103,09	314,21	417,30	478,325	61,025	295,855
23/05/2008	174,72	311,16	485,88	893,645	407,765	703,620
24/05/2008	160,90	326,32	487,22	562,375	75,155	778,775
25/05/2008	142,94	310,04	452,98	135,795	-317,185	461,590
26/05/2008	107,72	308,59	416,31	387,230	-29,080	432,510
27/05/2008	107,39	312,25	419,64	757,915	338,275	770,785
28/05/2008	130,55	299,75	430,30	570,965	140,665	911,450
29/05/2008	119,36	354,79	474,15	711,920	237,770	1149,220
30/05/2008	190,29	292,45	482,74	643,280	160,540	1309,760
31/05/2008	154,57	328,33	482,90	592,375	109,475	1419,235
TOTAL	3811,66	8065,13	11876,79	11953,11	-	1419,235

Tabla 7. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Junio De 2008



STOCK CARBONERA 31/05/08

1419,235

BALANCE CARBON DIARIO - JUNIO

FECHA	CONSUMO D3 TON.	CONSUMO D4 TON.	TOTAL CONSUMIDO	CARBON RECIBIDO	CARBON CARBONERA x DIA	STOCK CARBONERA
01/06/2008	70,17	273,66	343,83	142,890	-200,940	1218,295
02/06/2008	142,45	41,17	183,62	175,705	-7,915	1210,380
03/06/2008	64,98	290,42	355,40	375,520	20,118	1230,498
04/06/2008	138,30	299,79	438,09	559,535	121,445	1351,943
05/06/2008	133,14	326,50	459,64	588,590	128,950	1480,893
06/06/2008	141,00	271,79	412,79	651,795	239,005	1719,898
07/06/2008	148,67	190,47	339,14	434,925	95,785	1815,683
08/06/2008	123,53	243,03	366,56	34,680	-331,880	1483,803
09/06/2008	136,07	287,64	423,71	382,530	-41,180	1442,623
10/06/2008	130,47	247,79	378,26	361,040	-17,220	1425,403
11/06/2008	140,17	238,85	379,02	413,135	34,115	1459,518
12/06/2008	146,98	248,76	395,74	453,195	57,455	1516,973
13/06/2008	124,69	296,44	421,13	885,520	464,390	1981,363
14/06/2008	113,00	320,89	433,89	944,240	510,350	2491,713
15/06/2008	120,02	280,87	400,89	0,000	-400,890	2090,823
16/06/2008	138,88	266,67	405,55	376,900	-28,650	2062,173
17/06/2008	116,54	269,66	386,20	419,435	33,235	2095,408
18/06/2008	116,30	312,53	428,83	498,650	69,820	2165,228
19/06/2008	124,01	304,05	428,06	462,735	34,675	2199,903
20/06/2008	122,97	307,60	430,57	290,995	-139,575	2060,328
21/06/2008	147,64	294,78	442,42	239,280	-203,140	1857,188
22/06/2008	116,83	311,17	428,00	0,000	-428,000	1429,188
23/06/2008	114,52	264,32	378,84	287,210	-91,630	1337,558
24/06/2008	114,61	264,98	379,59	257,035	-122,555	1215,003
25/06/2008	124,25	244,51	368,76	367,665	-1,095	1213,908
26/06/2008	143,10	293,78	436,88	481,005	44,125	1258,033
27/06/2008	125,75	298,01	423,76	416,210	-7,550	1250,483
28/06/2008	145,80	256,61	402,41	540,500	138,090	1388,573
29/06/2008	66,08	319,68	385,76	99,440	-286,320	1102,253
30/06/2008	142,58	288,10	430,68	123,755	-306,925	795,328
TOTAL	3733,50	8154,52	11888,02	11264,115	-	795,328

Tabla 8. Balance De Carbón Diario Incauca S.A. Julio De 2008



STOCK CARBONERA 30/06/08
795,328

BALANCE CARBON DIARIO - JULIO

FECHA	CONSUMO D3 TON.	CONSUMO D4 TON.	TOTAL CONSUMIDO	CARBON RECIBIDO	CARBON CARBONERA x DIA	STOCK CARBONERA
01/07/2008	118,910	240,100	359,010	331,315	-27,695	767,633
02/07/2008	132,180	265,280	397,460	547,540	150,080	917,713
03/07/2008	116,060	294,510	410,570	625,925	215,355	1133,068
04/07/2008	114,060	268,470	382,530	415,665	33,135	1166,203
05/07/2008	122,600	290,900	413,500	351,785	-61,715	1104,488
06/07/2008	131,490	178,660	310,150	0,000	-310,150	794,338
07/07/2008	86,910	265,880	352,790	281,800	-70,990	723,348
08/07/2008	91,010	272,460	363,470	411,330	47,860	771,208
09/07/2008	96,380	238,000	334,380	334,535	0,155	771,363
10/07/2008	107,350	256,700	364,050	515,040	150,990	922,353
11/07/2008			0,000		0,000	922,353
12/07/2008			0,000		0,000	922,353
13/07/2008			0,000		0,000	922,353
14/07/2008			0,000		0,000	922,353
15/07/2008			0,000		0,000	922,353
16/07/2008			0,000		0,000	922,353
17/07/2008			0,000		0,000	922,353
18/07/2008			0,000		0,000	922,353
19/07/2008			0,000		0,000	922,353
20/07/2008			0,000		0,000	922,353
21/07/2008			0,000		0,000	922,353
22/07/2008			0,000		0,000	922,353
23/07/2008			0,000		0,000	922,353
24/07/2008			0,000		0,000	922,353
25/07/2008			0,000		0,000	922,353
26/07/2008			0,000		0,000	922,353
27/07/2008			0,000		0,000	922,353
28/07/2008			0,000		0,000	922,353
29/07/2008			0,000		0,000	922,353
30/07/2008			0,000		0,000	922,353
31/07/2008			0,000		0,000	922,353
TOTAL	1116,95	2570,96	3687,91	3814,935	-	922,353

9.2 BGAZO

El bagazo se conduce hacia las calderas mediante un sistema de conductores de tablillas las cuales (Ver figura 9-8) empujan literalmente el bagazo hacia los chutes que poseen en el fondo un pequeño alimentador de tablillas y estos conducen el bagazo hacia el hogar de las calderas.

Debido a la forma de conducción del bagazo, no se puede aplicar el mismo método que se utilizo en el carbón ya que el flujo no es constante, y la alimentación depende de que molinos estén trabajando en determinado instante.

Figura 25. Sistema De Conductores De Bagazo De Incauca S.A.

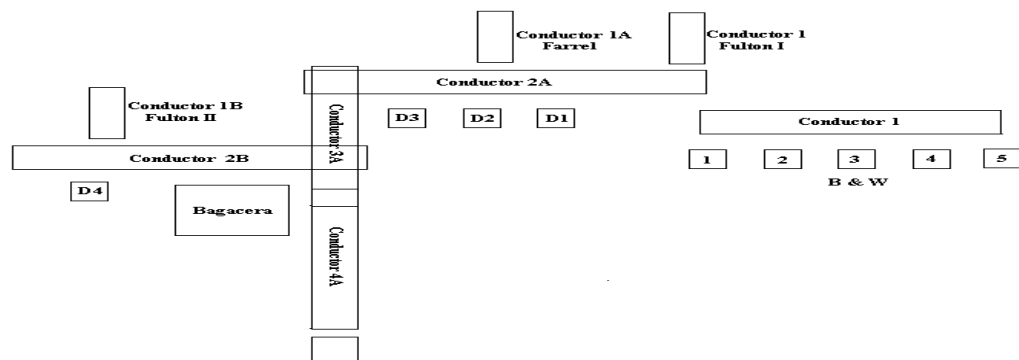


Figura 26. Conductor De Bagazo De Tablillas



Los alimentadores de tablillas que se encuentran ubicados en cada uno de los chutes de bagazo de cada una de las calderas son movidos por medio de un

motor hidráulico, la velocidad es controlada por los operarios en el cuarto de control mediante un porcentaje de la velocidad máxima que puede tener este.

Figura 27. Conductor De Bagazo De Tablillas De Los Chutes



Figura 28. Transmisión De Movimiento Hidráulica Alimentadores De Bagazo



Se buscaron métodos alternativos para la medición de este combustible, y al observar que los chutes mantenían completamente llenos y que la cantidad de bagazo era proporcional a la velocidad del hidráulico, se decidió realizar un aforo volumétrico por medio del siguiente método:

- Se tomaron las medidas de cada uno de los chutes y mediante el software Solid Edge se realizaron los isométricos y se sacaron adicionalmente los planos.
- Se tomaron diferentes muestras de bagazo en diferentes días y se tomaron datos de su densidad aparente y se promediaron. No se realizó factor de corrección por humedad ya que el bagazo sale de los molinos con una humedad con muy poca variabilidad.
- Se mandaron a colocar mirillas de vidrio en la parte frontal de cada uno de los chutes y se realizó una marca en un punto determinado. Mediante los isométricos hechos en Solid Edge y con dicho software se saca el volumen desde la parte superior hasta la marca hecha en el vidrio de la mirilla, así ya se tiene un volumen de control. Se determinaron los volúmenes con ayuda de software.

Figura 29. Chutes De Bagazo



- Se para el conductor de tablillas del chute y se deja llenar completamente, se cierran la compuerta superior del chute la cual permite o no el paso de bagazo hacia estos desde los conductores.
- Se manda a arrancar el conductor de tablillas del chute y se toma el tiempo que se demora en vaciar el chute desde la parte superior hasta la marca hecha en el la mirilla. Este procedimiento se hace para diferentes porcentajes de velocidad del

hidráulico. El porcentaje velocidad de trabajo del motor hidráulico se registra en formatos por los operarios con sus respectivas variaciones.

El flujo de bagazo por cada chute se determino por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{BAGAZO} = \frac{V * \rho}{t} \quad - \quad \text{Ecuación 9-2}$$

\dot{m}_{BAGAZO}	-	Flujo Másico
V	-	Volumen
ρ	-	Densidad
t	-	Tiempo

Se realizaron tablas para cada uno de los chutes de flujos másicos de bagazo Vs. % Hidráulico. Para cada caldera se suman los flujos másicos de cada chute que la alimente y este nos da el flujo total de bagazo hacia una determinada caldera.

9.3 BALANCE DE MASA BAGAZO

Se realizaron pruebas de consumo en los meses de Marzo, Abril y Mayo de 2008 en las 4 calderas obteniendo los siguientes resultados:

➤ **Caldera Distral 2.** En esta caldera se tuvieron problemas con esta medición ya que las compuertas de los chutes se encontraban dañadas y tenían poca apertura por lo que los chutes no se llenaban por la poca carga que recibían, debido a esto el método planteado no se podía aplicar hasta que se realizara el arreglo de las compuertas.

➤ **Calderas Distral 1, 3 Y 4.**

Tabla 9. Balance De Masa Bagazo Incauca S.A. Marzo 2008**BALANCE BAGAZO DIARIO - MARZO**

FECHA	CONSUMO D1	CONSUMO D3	CONSUMO D4	TOTAL CONSUMO CALDERAS	BAGAZO COMP. DONA.	TOTAL BAGAZO USUARIOS	BAGAZO PRODUCIDO	BAGAZO NO CONSUMIDO
18/03/2008	416,480	347,520	908,550	1672,550	161,010	1833,56	2271,826	438,266
19/03/2008	437,040	322,550	770,280	1529,870	530,980	2060,85	2522,093	461,243
20/03/2008	368,060	352,900	820,910	1541,870	546,645	2088,52	3209,940	1121,425
21/03/2008	498,650	382,030	758,760	1639,440	710,545	2349,99	3413,289	1063,304
22/03/2008	443,350	407,070	1020,470	1870,890	103,875	1974,77	2805,224	830,459
23/03/2008	450,470	421,100	944,050	1815,620	249,205	2064,83	3100,726	1035,901
24/03/2008	588,660	436,250	783,920	1808,830	651,920	2460,75	3414,310	953,560
25/03/2008	576,830	470,260	866,350	1913,440	369,855	2283,30	2856,722	573,427
26/03/2008	617,080	466,520	666,570	1750,170	747,135	2497,31	3155,898	658,593
27/03/2008	560,280	457,490	804,220	1821,990	557,960	2379,95	3214,946	834,996
28/03/2008	569,740	465,760	785,610	1821,110	635,095	2456,21	3186,470	730,265
29/03/2008	512,880	455,120	776,450	1744,450	550,010	2294,46	3385,756	1091,296
30/03/2008	390,900	474,610	878,730	1744,240	511,050	2255,29	2469,572	214,282
31/03/2008	164,720	491,130	937,760	1593,610	293,225	1886,84	2457,535	570,700

Tabla 10. Balance De Masa Bagazo Incauca S.A. Abril 2008**BALANCE BAGAZO DIARIO - ABRIL**

FECHA	CONSUMO D1	CONSUMO D3	CONSUMO D4	TOTAL CONSUMO CALDERAS	BAGAZO COMP. DONA.	TOTAL BAGAZO USUARIOS	BAGAZO PRODUCIDO	BAGAZO BAGACERA X DIA
01/04/2008	416,460	491,130	924,060	1831,65	67,765	1899,415	2149,329	249,914
02/04/2008	588,710	482,980	860,540	1932,23	212,030	2144,260	2521,547	377,287
03/04/2008	481,120	456,720	903,010	1840,85	541,670	2382,520	2571,321	188,801
04/04/2008	455,740	463,720	846,500	1765,96	509,230	2275,190	2468,496	193,306
05/04/2008	408,340	472,990	749,220	1630,55	696,150	2326,700	2954,788	628,088
06/04/2008	569,640	478,170	735,440	1783,25	990,385	2773,635	2877,505	103,870
07/04/2008	487,480	457,290	790,910	1735,68	619,875	2355,555	3048,834	693,279
08/04/2008	664,520	464,640	763,040	1892,20	728,555	2620,755	3377,683	756,928
09/04/2008	541,280	461,700	862,180	1865,16	413,985	2279,145	2718,772	439,627
10/04/2008	598,140	435,490	632,460	1666,09	326,645	1992,735	2880,438	887,703
11/04/2008	683,400	472,280	922,850	2078,53	212,620	2291,150	2956,047	664,897
12/04/2008	0,000	0,000	0,000	0,00	24,860	24,860	0,000	-24,860
13/04/2008	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
14/04/2008	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	709,458	709,458
15/04/2008	52,260	506,700	861,120	1420,08	38,950	1459,030	2195,099	736,069
16/04/2008	298,260	441,830	897,280	1637,37	89,785	1727,155	2219,846	492,691
17/04/2008	427,540	395,280	778,720	1601,54	519,790	2121,330	2514,933	393,603
18/04/2008	452,200	448,120	470,930	1371,25	393,430	1764,680	2103,012	338,332
19/04/2008	413,330	406,260	785,740	1605,33	661,880	2267,210	2819,534	552,324
20/04/2008	405,190	593,110	794,680	1792,98	696,080	2489,060	2830,215	341,155
21/04/2008	280,440	428,530	593,110	1302,08	256,805	1558,885	2599,294	1040,409
22/04/2008	603,220	451,490	782,840	1837,55	113,630	1951,180	2561,215	610,035
23/04/2008	265,420	350,130	577,120	1192,67	98,245	1290,915	987,960	-302,955

9.4 BAGACILLO

El bagacillo retornado por la planta de desmedulado de bagazo de Propal S.A. es pesado en dicha planta por medio de un Weightometro, y es conducido hacia las calderas Distral 3 y 4 por medio de una banda transportadora la cual descarga en un conductor de tablillas que descarga en pequeños chute que alimentan cada uno un conductor tornillo sin fin, que se encargan de alimentar el hogar de la caldera. Cada caldera posee 4 conductores tornillo sin fin.

Figura 30. Alimentación De Bagacillo



Al tener una carga constante de bagacillo en los conductores, se optó por realizar un aforo másico en cada uno de ellos. Se hicieron registros en la carcasa del conductor garantizando que todo el bagacillo saliera por el registro de la siguiente manera:

Figura 31. Conductores Tornillo Sin Fin De Bagacillo



La cantidad de bagacillo retornado depende de la cantidad de bagazo entero que Incauca le suministre a Propal S.A., esto es controlado por medio de una compuerta neumática la cual se controla por en porcentaje de su apertura total que sería el 100%. La apertura de compuerta de Incauca S.A. hacia Propal S.A. es reportada en un formato por los operarios.

Para tomar el aforo másico en cada chute se realizaron los siguientes pasos:

- Se realizaron registros en cada conductor.
- Se manda a parar el conductor y se abre el registro.
- Se manda a arrancar el conductor y se afora el bagacillo en un recipiente en un determinado tiempo (aproximadamente 10 segundos), no se toma mas tiempo ya que el flujo es muy alto.

Figura 32. Aforo De Bagacillo



Se tomaron aforos másicos en cada uno de los conductores en diferentes porcentajes de apertura de suministro de Propal S.A. Y se realizaron tablas de Flujos másicos Vs. %Propal para cada conductor que alimenta las calderas.

La alimentación total de bagacillo hacia cada caldera será entonces la suma de bagacillo a alimentar por cada conductor que alimente dicha caldera.

El flujo de bagacillo para cada chute se determino por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{BAGACILLO} = \frac{m_{BAGACILLO}}{t} \quad - \quad \text{Ecuación 9-3}$$

$\dot{m}_{BAGACILLO}$ - Flujo Másico
 $m_{BAGACILLO}$ - Masa de Bagacillo en t segundos.
 t - Tiempo

9.5 BALANCES DE MASA BAGACILLO

Se realizaron pruebas de consumo en los meses de Marzo y Abril de 2008 en las calderas Distral 3 y 4 y el consumido en la sección de elaboración de azúcar del ingenio obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 11. Consumo Bagacillo Incauca S.A. Marzo 2008

BALANCE BAGACILLO DIARIO - MARZO

FECHA	CONSUMO D3	CONSUMO D4	TOTAL CONSUMO CALDERAS	% BAGACILLO CACHAZA	TON. CACHAZA DIA	BAGACILLO ELABORACION	TOTAL CONSUMIDO	TON RETORNO PROPAL	DIFERENCIA PROPAL RETORNO - CONSUMO	% ERROR
18/03/2008	0,000	104,240	104,240	6,60	468,470	30,919	135,159	131,100	-4,059	3,10
19/03/2008	29,220	530,100	559,320	7,20	455,605	32,804	592,124	597,200	5,076	0,85
20/03/2008	50,770	384,630	435,400	7,60	596,705	45,350	480,750	483,700	2,950	0,61
21/03/2008	42,140	526,640	568,780	6,20	496,235	30,767	599,547	568,000	-31,547	5,55
22/03/2008	2,460	36,860	39,320	6,20	418,285	25,934	65,254	68,500	3,246	4,74
23/03/2008	14,980	151,240	166,220	6,10	645,235	39,359	205,579	217,200	11,621	5,35
24/03/2008	42,090	541,170	583,260	6,20	546,140	33,861	617,121	607,700	-9,421	1,55
25/03/2008	18,270	241,170	259,440	5,80	495,190	28,721	288,161	303,000	14,839	4,90
26/03/2008	34,840	538,940	573,780	6,70	477,155	31,969	605,749	598,500	-7,249	1,21
27/03/2008	36,740	472,250	508,990	6,00	499,155	29,949	538,939	559,400	20,461	3,66
28/03/2008	35,570	506,430	542,000	6,00	565,305	33,918	575,918	568,700	-7,218	1,27
29/03/2008	33,110	368,610	401,720	6,90	655,700	45,243	446,963	483,900	36,937	7,63
30/03/2008	37,540	404,820	442,360	6,90	582,605	40,200	482,560	514,000	31,440	6,12
31/03/2008	13,420	191,070	204,490	4,50	496,870	22,359	226,849	237,400	10,551	4,44

Tabla 12. Consumo Bagacillo Incauca S.A. Abril 2008

BALANCE BAGACILLO DIARIO - ABRIL

FECHA	CONSUMO D3	CONSUMO D4	TOTAL CONSUMO CALDERAS	% BAGACILLO CACHAZA	TON. CACHAZA DIA	BAGACILLO ELABORACION	TON CONSUMIDAS	TON RETORNO PROPAL	DIFERENCIA PROPAL RETORNO - CONSUMO	% ERROR
02/04/2008	7,380	149,690	157,070	6,10	710,530	43,342	200,412	194,400	-6,012	3,09
03/04/2008	0,000	364,830	364,830	5,70	796,825	45,419	410,249	431,600	21,351	4,95
04/04/2008	12,950	396,070	409,020	6,20	674,100	41,794	450,814	450,300	-0,514	0,11
05/04/2008	42,740	501,210	543,950	6,20	495,540	30,723	574,673	554,800	-19,873	3,58
06/04/2008	61,360	682,850	744,210	6,90	501,670	34,615	778,825	722,500	-56,325	7,80
07/04/2008	37,900	385,120	423,020	6,50	549,290	35,704	458,724	460,800	2,076	0,45
08/04/2008	19,910	502,510	522,420	6,70	806,970	54,067	576,487	576,600	0,113	0,02
09/04/2008	20,550	335,210	355,760	5,23	557,640	29,165	384,925	398,400	13,475	3,38
10/04/2008	11,820	280,830	292,650	6,70	419,745	28,123	320,773	343,800	23,027	6,70
11/04/2008	7,920	129,180	137,100	4,87	653,735	31,837	168,937	171,100	2,163	1,26
17/04/2008	24,760	377,590	402,350	5,30	534,170	28,311	430,661	399,300	-31,361	7,85
18/04/2008	24,410	219,470	243,880	6,10	535,525	32,667	276,547	304,900	28,353	9,30
19/04/2008	28,420	479,340	507,760	4,00	482,510	19,300	527,060	530,200	3,140	0,59
20/04/2008	20,130	423,460	443,590	3,90	458,775	17,892	461,482	540,800	79,318	14,67
21/04/2008	5,250	82,030	87,280	4,00	610,620	24,425	111,705	114,500	2,795	2,44

Como se puede observar las diferencias entre el bagacillo retornado y el consumo son normalmente pequeñas, el error entre uno y otro en es menor al 5% en la mayoría de los días evaluados. Los días en que la diferencia da un valor positivo es bagacillo que no se consumió y por tanto se almaceno en la bodega de bagazo. Los días en que la diferencia da un valor negativo es bagacillo que se consumió adicional de la bodega de bagazo.

➤ **Balance De Masa Bagazo-Bagacillo.** El balance bagazo se rige mediante la siguiente formula:

$$\text{Stock Actual} = \text{Stock inicial} + \text{Bagazo Diario Molinos} - \text{Consumo Calderas} - \text{Bagazo compostaje y Donaciones} - \text{Consumo Bagacillo Elaboración} - \text{Fibra Propal S.A.} - \text{Bagacillo Retornado}$$

- Stock inicial: Este valor es difícil de calcular por el arrume de bagazo en bodega, por lo que se puede estimar como un porcentaje de la capacidad total de la bodega que es de 380 toneladas.

Figura 33. Almacenamiento De Bagazo



- Bagazo diario proveniente de los molinos: Este dato es proporcionado por el laboratorio de Incauca S.A. todos los días, dato tomado cada 24 horas.
- Consumo calderas: Dato calculado para las calderas 1, 3 y 4.

- Compostaje y Donaciones: Este bagazo es pesado en las básculas al salir de fábrica.
- Consumo Elaboración: El proceso de elaboración consume bagacillo para la formación de torta de cachaza. La cachaza es pesada en básculas y laboratorio reporta el dato de porcentaje de bagacillo en cachaza, de esta manera dicho porcentaje del peso total de la cachaza sería el consumo de bagacillo por esta sección de la planta.
- Fibra Propal S.A.: Esta se pesa en básculas a la salida de la planta.
- Bagacillo retornado: Dato reportado por la planta de Propal S.A. medido en el Weightometro instalado en la banda transportadora.

De esta manera para realizar el balance de masa del bagazo, tendríamos como incógnitas el consumo en la caldera Distral 2 y el stock de bagazo.

10 BALANCE TERMICO DE LAS CALDERAS

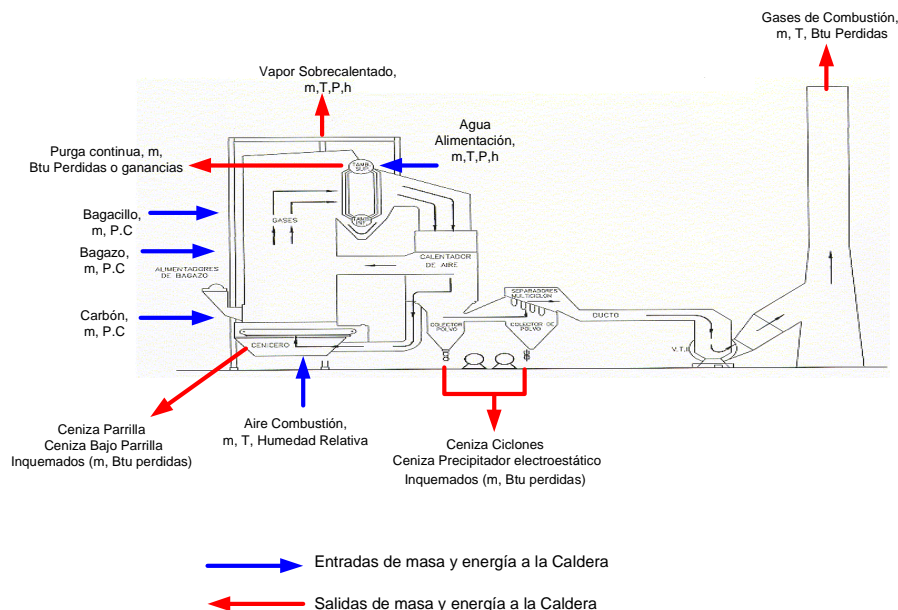
Se realizaron cálculos de eficiencias para las calderas 1, 3 y 4 se utilizo el Código de Pruebas de la Asme “Asme Power Test Codes”: Este código contempla dos métodos aceptados para determinar la eficiencia de generadores de vapor.

- El método de medición directa de las entradas y las salidas, denominado como **Método de Entrada – Salida** (“Input - Output”).
- El método de la medición directa de las pérdidas de calor, denominado como **Método de las Perdidas** (“Heat Looses Method”).

10.1 BALANCE MASA Y ENERGIA

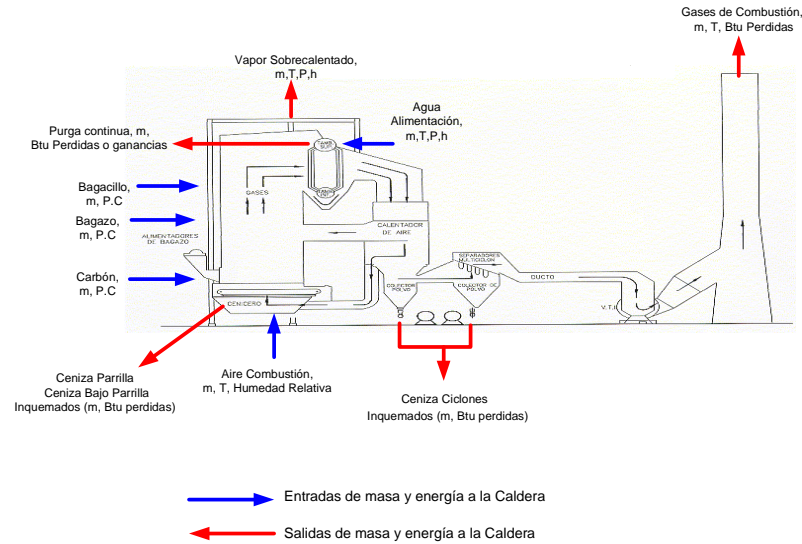
◆ Esquema de balance masa y energía Distral 4

Figura 34. Balance Masa Y Energía Caldera Distral 4



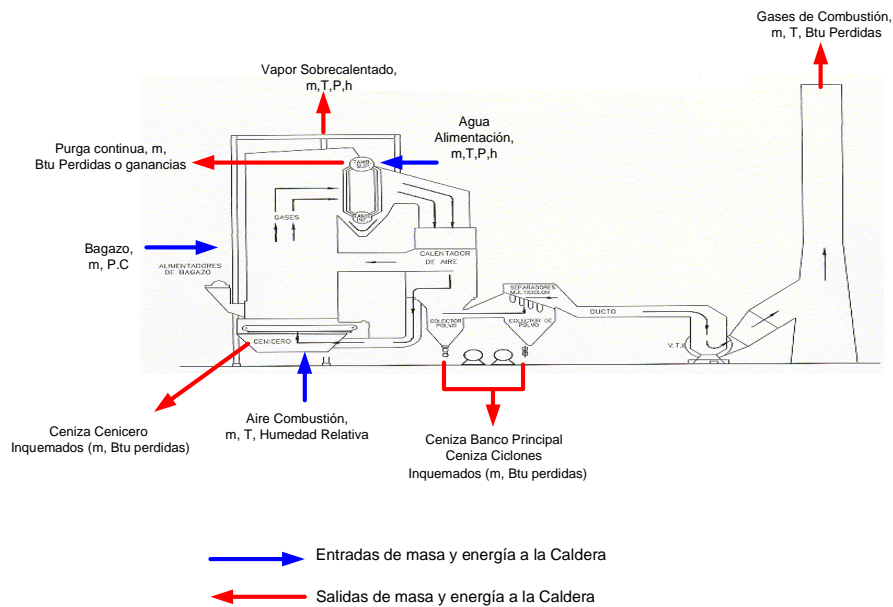
◆ Esquema de balance masa y energía Distral 3

Figura 35. Balance De Masa Y Energía Caldera Distral 3



◆ Esquema de balance masa y energía Distral 1 y 2

Figura 36. Balance De Masa Y Energía Calderas Distral 1 Y 2



Para corroborar que los métodos planteados para la medición de consumo de combustibles son validos se realizaron dos pruebas comparativas aplicando ambos métodos de medición de eficiencias energéticas en calderas. Se realizo una prueba en la caldera Distral 3 y otra en la caldera Distral 4.

Se tomaron muestras de carbón, bagazo y bagacillo y se mandaron a realizar análisis proximales y elementales en la Universidad del Valle (Ver Anexo H).

Se utilizaron las fórmulas del “Asme Power Test Codes” (ver anexo C) para realizar el calculo de eficiencias térmicas. Se realizo una prueba para caldera Distral 3 y una prueba para Distral 4 durante 2,5 horas, se obtuvieron los siguientes resultados:

10.2 EFICIENCIA CALDERA DISTRAL 4 METODO INDIRECTO

Tabla 13. Datos de Operación Caldera Distral 4 – Prueba Eficiencia

DATOS CALDERA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Tiempo total de la Prueba	Horas	t	2,5
Capacidad nominal de la Caldera	Lb/h	Dvt	300000
Perdidas por Radiacion a Carga Nominal	%	q5nom	0,44
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvs	646788,8
Presion de Vapor Sobrecalentado Manometrica	psig	Pvs	632,7
Temperatura de Vapor Sobrecalentado	°F	Tvs	726,1
Entalpia Vapor Sobrecalentado	Btu/Lb	hvs	1364,29
Presion de agua de alimentacion Manometrica	psig	Paa	992
Temperatura de agua de alimentacion	°F	Taa	227,2
Entalpia Agua de Alimentacion	Btu/Lb	haa	197,655
Presion del Domo Manometrica	°F	Pd	690
Entalpia Vapor Saturado a Presion del Domo	Btu/Lb	hvs	1202,12
Entalpia Agua Saturada a Presion del Domo	Btu/Lb	hls	489,763
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	hvp	1259,17
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	hwsat	53,0075
CONDICIONES ATMOSFERICAS			
Temperatura del aire ambiente	°F	Ta	84,95
Presion Atmosferica	psia	Pa	13,19
Humedad Relativa del Aire Ambiente	%	Warela.	83
Humedad Absoluta del Aire Ambiente	lb/lb	da	0,0216
Humedad Absoluta del Aire Ambiente	g/Kg	da	21,6

Todos los datos de operación de la caldera fueron tomados en el cuarto de control. Las entalpías¹² fueron calculadas de tablas de vapor y la humedad relativa del aire ambiente fue tomada de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de Cenicaña¹³ en el corregimiento de El Ortigal Miranda departamento del Cauca.

La humedad absoluta del aire ambiente es calculada por medio de la Carta Psicrometrica del aire (Ver Anexo B).

Tabla 14. Propiedades De La Ceniza Distral 4

DATOS DE LA CENIZA			
MULTICICLON			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crn	21,79
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrn	2369
PRECIPITADOR ELECTROESTATICO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crp	13,21
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrp	1507
PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crpr	12,03
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrpr	797
BAJO PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crbp	6,4
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrbp	94
RESIDUOS VOLANTES			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crv	0
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrv	0

Se tomaron muestras de ceniza en cada uno de los puntos que se especifican con excepción de los residuos volantes ya que para tomar muestras de cenizas en los gases de combustión es necesaria instrumentación especializada.

¹² CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica. Vol.1. 4 ed. México: Mac. Graw Hill., 2002. p. 720.

¹³ Boletín Diario de la RMA [en línea]. El Ortigal, Miranda: CENICAÑA., 2008. [Consultado 04 de Julio de 2008]. Disponible en Internet: www.cenicaña.org

Tabla 15. Análisis Isocinetico De Gases De Combustión Caldera Distral 4

ANALISIS DE GASES DE SALIDA (COMBUSTION)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Dioxido de carbono	%	CO2	12,27
Porcentaje de Oxigeno	%	O2	7,97
Cantidad de Monoxido de carbono	ppm	CO	674,33
Cantidad de Oxidos de Nitrogeno	ppm	NOx	140
Cantidad de Dioxido de Azufre	ppm	SO2	108,67
Porcentaje de Nitrogeno	%	N2	79,67
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	437,33

Tabla 16. Propiedades Combustibles De Alimentación Distral 4

MEZCLA DE COMBUSTIBLE ENTRANDO A LA CALDERA			
ANALISIS COMBUSTIBLE (CARBON)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Carbono	%	C	48,8
Porcentaje de Hidrogeno	%	H	3,36
Porcentaje de Oxigeno	%	O	17,05
Porcentaje de Nitrogeno	%	N	1,11
Porcentaje de Azufre	%	S	2,11
Porcentaje de Ceniza	%	A	15,87
Porcentaje de Humedad	%	W	3,91
Poder calorifico Superior del Carbon	Btu/Lb	Qic	12060
Consumo de Carbon	LB	Dcarbon	16380
ANALISIS COMBUSTIBLE (BAGAZO)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Carbono	%	C	42,74
Porcentaje de Hidrogeno	%	H	4,82
Porcentaje de Oxigeno	%	O	37,63
Porcentaje de Nitrogeno	%	N	0,81
Porcentaje de Azufre	%	S	0,015
Porcentaje de Ceniza	%	A	5,58
Porcentaje de Humedad	%	W	53
Poder calorifico Superior del Bagazo	Btu/Lb	Qib	7477
Consumo de Bagazo	Lb	Dbagazo	97760
ANALISIS COMBUSTIBLE (BAGACILLO)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Carbono	%	C	40,68
Porcentaje de Hidrogeno	%	H	4,62
Porcentaje de Oxigeno	%	O	36,15
Porcentaje de Nitrogeno	%	N	0,68
Porcentaje de Azufre	%	S	0,014
Porcentaje de Ceniza	%	A	3,78
Porcentaje de Humedad	%	W	51,4
Poder calorifico Superior del Bagacillo	Btu/Lb	Qibag	7718
Consumo de Bagacillo	Lb	Dbagacillo	47720
MEZCLA (CARBON. BAGAZO Y BAGACILLO)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Consumo de Carbon	Lb	Dcarbon	16380
Consumo de Bagazo	Lb	Dbagazo	97760
Consumo de Bagacillo	Lb	Dbagacillo	47720
% Carbon por libra de combustible	%	%CARBON	10,12
% Bagazo por libra de combustible	%	%BAGAZO	60,40
% Bagacillo por libra de combustible	%	%BAGACILLO	29,48
Porcentaje de Carbono (Promedio Ponderado)	%	C	42,75
Porcentaje de Hidrogeno (Promedio Ponderado)	%	H	4,61
Porcentaje de Oxigeno (Promedio Ponderado)	%	O	35,11
Porcentaje de Nitrogeno (Promedio Ponderado)	%	N	0,80
Porcentaje de Azufre (Promedio Ponderado)	%	S	0,23
Porcentaje de Ceniza (Promedio Ponderado)	%	A	6,09
Porcentaje de Humedad (Promedio Ponderado)	%	W	47,56
Poder calorifico Superior del combustible	Btu/Lb	Qd	8012
Consumo de Combustible Total	Lb	Df	161860

*Muestras de Combustibles enviadas a Univalle para Análisis Elemental y Próximo.

Para calcular las propiedades del combustible entrando a la caldera se saca el promedio ponderado de estos de acuerdo a las cantidades de cada combustible de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$Pr om.Ponderado = \frac{Pr opiedad *(Ton.Carbon) + Pr opiedad *(Ton.Bagazo) + Pr opiedad *(Ton.Bagacillo)}{Ton.Carbon + Ton.Bagazo + Ton.Bagacillo} - \text{Ecuación 10-1}$$

Tabla 17. Calculo Del Aire Requerido Para La Combustión Distral 4

CALCULO DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTION			
CARBON			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	59,09
Coefficiente de exceso de aire	-	a	1,59
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,59
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,99
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,58
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	12,05
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	1,36
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	5,10
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	4,73
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	7,53
BAGAZO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	59,09
Coefficiente de exceso de aire	-	a	1,59
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,53
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,74
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,26
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	11,56
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	1,07
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	4,01
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,82
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	6,08
BAGACILLO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	59,09
Coefficiente de exceso de aire	-	a	1,59
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,45
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,47
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	6,93
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	11,02
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	0,50
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	1,88
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,64
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	5,79
TOTAL DE AIRE REQUERIDO POR LIBRA DE COMBUSTIBLE			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	59,09
Coefficiente de exceso de aire	-	a	1,59
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,51
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,69
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,20
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	11,45
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	0,93
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	3,50
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,86
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	6,14

En la tabla 10-5 se puede ver el calculo de aire requerido para la combustión estequiométrica y de aire con exceso primero para una libra de cada combustible y para una libra de mezcla de combustibles, para ello se utilizo de nuevo la ecuación 10-1.

Tabla 18. Volumen De Los Productos De Combustión DISTRAL 4

<u>VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION</u>			
<u>CARBON</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,93
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	3,75
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	0,59
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	0,68
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	4,67
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	7,47
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	8,15
<u>BAGAZO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,80
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	9,14
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,56
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	1,63
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	9,93
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	12,19
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	13,83
<u>BAGACILLO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,76
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	2,88
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,28
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	1,35
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	3,64
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	5,79
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	7,14
<u>VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION POR LIBRA DE COMBUSTIBLE</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,80
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	6,75
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,38
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	1,45
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	7,55
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	9,83
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	11,28

Volumen de gases de combustión que se formarían por libra de cada combustible individualmente y por libra de mezcla de combustibles.

Tabla 19. Calor Disponible Distral 4

CALOR DISPONIBLE (Qd)			
$Qd = Qi + Qpca + Qvat$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Calor suministrado con el vapor de atomizacion	Btu/Lb	Qvat	0
Calor añadido en precalentador de aire	Btu/Lb	Qpca	0
Poder Calorífico Superior del Combustible	Btu/Lb	Qi	8011,85
Calor Disponible	Btu/Lb	Qd	8011,85

El calor disponible es igual al calor aportado por los combustibles ya que en esta caldera no se atomiza ningún tipo de combustible líquido y el precalentador de aire trabaja con los gases de combustión y no con vapor ni con otra fuente externa.

◆ **Perdidas Térmicas.**

Tabla 20. Perdida De Calor Por Humedad En El Combustible Distral 4

Perdidas de Calor debidas a la Humedad en el Combustible (q2)			
$q_2 = \frac{W}{100} \cdot (h_{pv} - h_{wsat})$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Humedad en el Combustible	%	W	47,560
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	371,33
Temperatura del Aire Ambiente	°F	Ta	84,95
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	h _{pv}	1259,17
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	h _{wsat}	53,0075
Perdidas por Humedad Combustible	Btu/Lb	q2	573,66

Tabla 21. Perdida De Calor Por Humedad En El Aire De Combustión Distral 4

Perdidas de Calor debidas a la Humedad en el Aire de Combustion (q3)			
$q_3 = 0.46 \cdot da \cdot ma \cdot (T_g - T_a)$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Temperatura del Aire a entrar en la Caldera	°F	Ta	84,95
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	437,33
Humedad Relativa del Aire Ambiente	%	da	83
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	11,45
Peso de vapor de agua por libra de aire a Temp. Ambiente	Lb/Lb	da	0,0216
Perdidas por Humedad en el Aire	Btu/Lb	q3	40,08

Tabla 22. Perdida De Calor Por Hidrogeno En El Combustible Distral 4

Perdidas de Calor debidas al Hidrogeno en el Combustible que forma Vapor de Agua (q4)			
$q_4 = \frac{9H}{100} \cdot (h_{pv} - h_{wsat})$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	h _{pv}	1259,17
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	h _{wsat}	53,0075
Porcentaje de Hidrogeno en el Combustible	%	H	4,61
Perdidas por Humedad Combustible	Btu/Lb	q4	500,79

Tabla 23. Perdida De Calor Gases Secos En Chimenea Distral 4

Perdidas de Calor por Gases Secos en Chimenea (q5)			
$q_5 = W_g * C_{pg} * (T_g - T_a)$ $W_g = \frac{11 - CO_2 + 8.O_2 + 7.(N_2 + CO)}{3.(CO_2 + CO)} \cdot \left[\left(\frac{C}{100} - \frac{Hr.Wr}{14500} \right) + \frac{S}{267} \right]$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Peso Gases Secos en Chimenea (Por libra de Combustible)	Lb/Lb	W _g	6,65
Calor Especifico Gases secos de Combustion	Btu/Lb°F	C _{pg}	0,24
Temperatura de Gases de Combustion	°F	T _g	437,33
Temperatura del Aire a entrar en la Caldera	°F	T _a	84,95
Perdidas en Gases de Salida	Btu/Lb	q5	562,77

Tabla 24. Perdida De Calor Por Combustión Incompleta Distral 4

Perdidas de Calor por Combustion Incompleta (q6)			
$q_6 = \left(\frac{CO}{CO + CO_2} \right) * C * 10190$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Dioxido de carbono	%	CO ₂	12,27
Cantidad de Monoxido de carbono	ppm	CO	674,33
Peso de Carbono en Gases de Combustion	%	C	42,75
Perdidas Combustion Incompleta	Btu/Lb	q6	23,81

Tabla 25. Perdida De Calor Por Combustible No Quemado Distral 4

PERDIDA POR COMBUSTIBLE NO QUEMADO o INQUEMADOS (q7)			
$q_7 = q_{rm} + q_{rp} + q_{rpr} + q_{rbp} + q_{rv}$		$q_7 = \sum Hr * Wr$	$Wr = \frac{A}{100 - Cr}$
MULTICICLON			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crm	21,79
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrm	2369
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,091
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrm	184,49
PRECIPITADOR ELECTROESTATICO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crp	13,21
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrp	1507
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,09
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrp	105,76
PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crpr	25
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrpr	1253
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,09
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrpr	101,75
BAJO PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crbp	15
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrbp	800
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,09
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrv	57,32
RESIDUOS VOLANTES			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crv	12
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrv	100
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,09
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrm	6,92
Perdidas por Inquemados	Btu/Lb	q7	456,24

Tabla 26. Perdidas Por Radiación Y Convección Distral 4

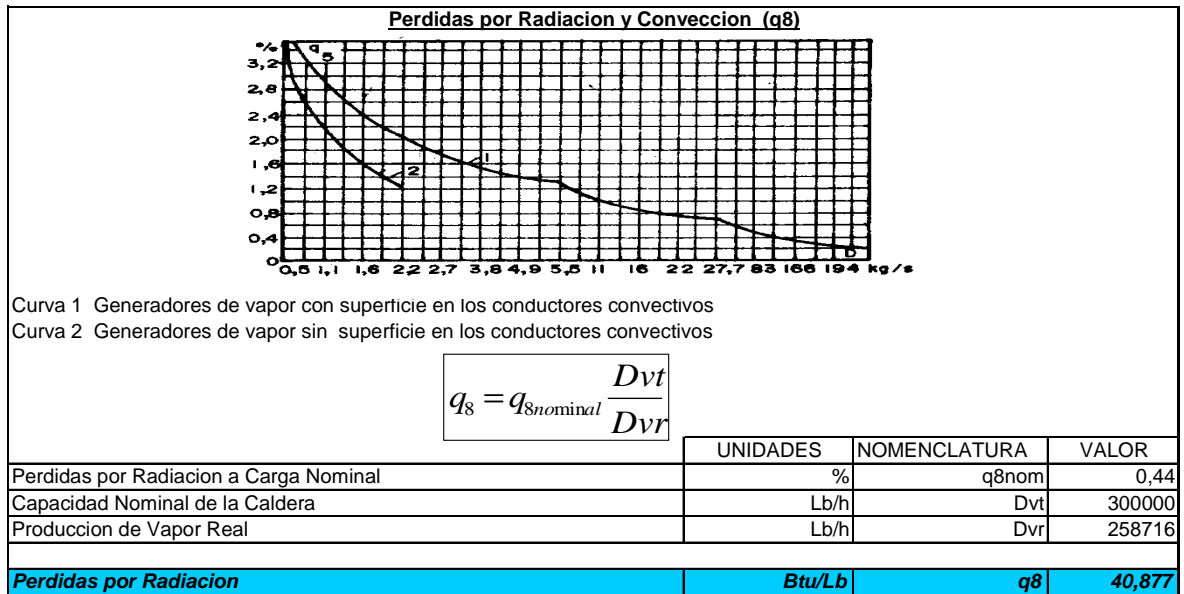


Tabla 27. Perdidas Por Purgas Distral 4

Perdidas por Purgas (q9)			
$q_9 = \frac{Dp^*(hls-haa)}{Df}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Flujo de agua extraida por purgas	Lb	Dp	32339,44
Presion Absoluta de Domo	psia	Pda	703,19
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	489,76
Presion Absoluta de agua de alimentacion	psia	Paa	1005,19
Temperatura de agua de alimentacion	°F	Taa	227,2
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,655
Perdidas por Purgas	Btu/Lb	q7	58,36

Tabla 28. Perdidas Indeterminadas Distral 4

Perdidas Indeterminadas (q10)			
$q_{10} = 1.5\% * Q_D$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Calor Disponible	Btu/Lb	Qd	8011,85
Perdidas Indeterminadas	Btu/Lb	q10	120,18

Tabla 29. Calor Útil Distral 4

Calor Util (Q1)			
$Q_1 = \frac{Dv * ((hv - had) + (hv - her))}{Qf}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvr	646789
Presion Absoluta de Vapor Sobrecalentado	psia	Pvsa	645,89
Temperatura de Vapor Sobrecalentado	°F	Tvs	726,10
Presion Absoluta de Domo	psia	Pda	703,19
Entalpia del Vapor Sobrecalentado	Btu/Lb	hvs	1364,29
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,655
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	489,763
Entalpia del vaporsaturado (vapor saturado a P de domo)	Btu/Lb	her	1202,12
Calor Util	Btu/Lb	Q1	5309,87

Tabla 30. Gasto De Combustible Distral 4

Gasto de Combustible (Df)			
$D_f = D_{CARBON} + D_{BAGAZO} + D_{BAGACILLO}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Consumo de Carbon	Lb	Dcarbon	16380
Consumo de Bagazo	Lb	Dbagazo	97760
Consumo de Bagacillo	Lb	Dbagacillo	47720
Gasto de Combustible	Lb	Df	161860,00

Tabla 31. Eficiencia Térmica Indirecta Distral 4

EFICIENCIA INDIRECTA (n INDIRECTA)			
$\eta_{INDIRECTA} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10})$			
	NOMENCLATURA	Btu/Lb	%
Perdidas por Humedad en Combustible	q2	573,66	7,16
Perdidas por Humedad en Aire Combustion	q3	40,08	0,50
Perdidas por Hidrogeno (Forma Vapor Agua)	q4	500,79	6,25
Pedidas por Gases Secos en Chimenea	q5	562,77	7,02
Perdidas por Combustion Incompleta	q6	23,81	0,30
Perdidas por Combustible no quemado	q7	456,24	5,69
Perdidas por Radiacion y Conveccion	q8	40,88	0,51
Perdidas por Purgas	q9	58,36	0,73
Perdidas Indeterminadas	q10	120,18	1,5
TOTAL DE PERDIDAS	qtotal	2376,78	29,67
Calor Absorbido por la caldera (Calor Util)	Q1	5309,87	66,28
CALOR TOTAL	-	7686,65	95,94
Eficiencia Indirecta	%	nINDIRECTA	70,33

Tabla 32. Eficiencia Térmica Directa Distral 4

EFICIENCIA DIRECTA (η DIRECTA)			
$\eta_{DIRECTA} = \frac{D_v((h_{vs} - h_{aa}) + (h_{vs} - h_{sv})) + D_p(h_{ls} - h_{aa})}{D_f * Q_d}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvs	646788,8
Flujo de agua extraida por purgas	Lb	Dp	32339
Gasto de Combustible	Lb	Df	161860
Entalpia de Vapor Saturado a Presion de Domo	Btu/Lb	hls	1202,12
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	489,76
Entalpia del vapor producido	Btu/Lb	hvs	1364,29
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,66
Poder calorifico Superior del combustible	Btu/Lb	Qd	8012
Eficiencia Directa	%	nDIRECTA	67,00
$\% ERROR = \frac{\eta_{INDIRECTA} - \eta_{DIRECTA}}{\eta_{INDIRECTA}} \times 100$			
%ERROR	%	-	3,09

Como se puede observar el porcentaje de error entre la eficiencia directa e indirecta es del 3,09% este valor es muy bajo lo que indica que la medición de flujo de combustibles es bastante acertada. Esta diferencia radica en las pérdidas por radiación y convección, ya que hay partes de la caldera que se encuentran sin el debido aislamiento y se detectaron zonas donde había huecos en la lámina debido a la abrasión provocada por las cenizas en los gases de combustión.

La eficiencia térmica de esta caldera esta dando bastante alta lo que indica que en el momento de realizar la prueba los combustibles de alimentación se encontraban con muy buenas propiedades y el aire de combustión se encontraba con un exceso adecuado para los combustibles alimentados.

10.3 EFICIENCIA CALDERA DISTRAL 3 METODO INDIRECTO

La caldera Distral 3 no posee precipitador electroestático y al haberse tomado la prueba simultáneamente con la de la caldera Distral 4 la alimentación de combustibles era exactamente la misma.

Tabla 33. Datos de Operación Caldera Distral 3 – Prueba Eficiencia

DATOS CALDERA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Timepo total de la Prueba	Horas	t	2,5
Capacidad nominal de la Caldera	Lb/h	Dvt	200.000
Perdidas por Radiacion a Carga Nominal	%	q5nom	0,44
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvs	357340
Presion de Vapor Sobrecalentado Manometrica	psig	Pvs	636,3
Temperatura de Vapor Sobrecalentado	°F	Tvs	735,5
Entalpia Vapor Sobrecalentado	Btu/Lb	hvs	1369,54
Presion de agua de alimentacion Manometrica	psig	Paa	971,95
Temperatura de agua de alimentacion	°F	Taa	227,2
Entalpia Agua de Alimentacion	Btu/Lb	haa	197,612
Presion del Domo Manometrica	°F	Pd	678,1
Entalpia Vapor Saturado a Presion del Domo	Btu/Lb	hvs	1202,38
Entalpia Agua Saturada a Presion del Domo	Btu/Lb	hls	487,469
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	hvp	1234,97
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	hwsat	53,0075
CONDICIONES ATMOSFERICAS			
Temperatura del aire ambiente	°F	Ta	84,95
Presion Atmosferica	psia	Pa	13,19
Humedad Relativa del Aire Ambiente	%	Warela.	83
Humedad Absoluta del Aire Ambiente	lb/lb	da	0,0216
Humedad Absoluta del Aire Ambiente	g/Kg	da	21,6

Tabla 34. Propiedades De La Ceniza Distral 3

DATOS DE LA CENIZA			
MULTICICLON			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crm	35,36
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrm	5079
PRECIPITADOR ELECTROESTATICO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crp	0
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrp	0
PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crpr	15,68
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrpr	1404,04
BAJO PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crbp	13,36
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrbp	864
RESIDUOS VOLANTES			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crv	0
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrv	0

Tabla 35. Propiedades Combustibles De Alimentación Distral 3

MEZCLA (CARBON. BAGAZO Y BAGACILLO)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Consumo de Carbon	Lb	Dcarbon	13220
Consumo de Bagazo	Lb	Dbagazo	66140
Consumo de Bagacillo	Lb	Dbagacillo	9140
% Carbon por libra de combustible	%	%CARBON	14,94
% Bagazo por libra de combustible	%	%BAGAZO	74,73
% Bagacillo por libra de combustible	%	%BAGACILLO	10,33
Porcentaje de Carbono (Promedio Ponderado)	%	C	43,43
Porcentaje de Hidrogeno (Promedio Ponderado)	%	H	4,58
Porcentaje de Oxigeno (Promedio Ponderado)	%	O	34,40
Porcentaje de Nitrogeno (Promedio Ponderado)	%	N	0,84
Porcentaje de Azufre (Promedio Ponderado)	%	S	0,33
Porcentaje de Ceniza (Promedio Ponderado)	%	A	6,93
Porcentaje de Humedad (Promedio Ponderado)	%	W	45,50
Poder calorifico Superior del combustible	Btu/Lb	Qd	8186
Consumo de Combustible Total	Lb	Df	88500

Tabla 36. Análisis Isocinetico De Gases De Combustión Caldera Distral 3

ANALISIS DE GASES DE SALIDA (COMBUSTION)			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Dioxido de carbono	%	CO2	8,83
Porcentaje de Oxigeno	%	O2	11,83
Cantidad de Monoxido de carbono	ppm	CO	120,33
Cantidad de Oxidos de Nitrogeno	ppm	NO x	157
Cantidad de Oxidos de Azufre	ppm	SO x	225,33
Porcentaje de Nitrogeno	%	N2	79,29
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	385,33

Tabla 37. Volumen De Los Productos De Combustión Distral 3

CALCULO DE AIRE REQUERIDO PARA LA COMBUSTION			
<u>CARBON</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	125,23
Coefficiente de exceso de aire	-	a	2,25
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,59
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,99
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,58
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	17,07
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	1,36
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	5,10
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	4,73
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	10,66
<u>BAGAZO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	125,23
Coefficiente de exceso de aire	-	a	2,25
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,53
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,74
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,26
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	16,36
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	1,07
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	4,01
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,82
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	8,61
<u>BAGACILLO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	125,23
Coefficiente de exceso de aire	-	a	2,25
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,45
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,47
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	6,93
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	15,60
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	0,50
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	1,88
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,64
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	8,19
<u>TOTAL DE AIRE REQUERIDO POR LIBRA DE COMBUSTIBLE</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Exceso de Aire	%	EA	125,23
Coefficiente de exceso de aire	-	a	2,25
Libras de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mO2°	1,54
Libras de Nitrogeno requerido por libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	mN2°	5,75
Libras de aire requerido por Libra de combustible (Teorico)	Lb/Lb	ma°	7,28
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	16,39
Volumen de Oxigeno requerido por libra de combustible (Teorico)	m3/Kg	Vo2°	1,05
Volumen de Nitrogeno Rquerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	VN2°	3,96
Volumen de Aire requerido por Libra de Combustible (Teorico)	m3/Kg	Va°	3,94
Volumen de Aire con exceso (Real)	m3/Kg	Va	8,88

Tabla 38. Volumen De Los Productos De Combustión Distral 3

<u>VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION</u>			
<u>CARBON</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,93
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	3,75
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	0,59
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	0,79
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	4,67
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	10,60
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	11,39
<u>BAGAZO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,80
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	12,93
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,96
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	2,13
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	13,73
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	18,52
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	20,65
<u>BAGACILLO</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,76
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	2,88
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,28
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	1,44
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	3,64
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	8,19
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	9,63
<u>VOLUMEN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION POR LIBRA DE COMBUSTIBLE</u>			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Volumen Teorico de Gases Triatomicos	m3/Kg	VRO2°	0,81
Volumen de Nitrogeno Teorico	m3/Kg	VN2°	10,52
Volumen Teorico de Vapor de Agua	m3/Kg	VH2O°	1,69
Volumen real de vapor de agua	m3/Kg	VH2O	1,86
Volumen teorico de Gases Secos	m3/Kg	Vgs°	11,33
Volumen real de Gases Secos	m3/Kg	Vgs	16,27
Volumen Real de Gases de Combustion	m3/Kg	Vg	18,13

Tabla 39. Calor Disponible Distral 3

<u>CALOR DISPONIBLE (Qd)</u>			
$Qd = Qi + Qpca + Qvat$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Calor suministrado con el vapor de atomizacion	Btu/Lb	Qvat	0
Calor añadido añadido en precalentador de aire	Btu/Lb	Qpca	0
Poder Calorífico Superior del Combustible	Btu/Lb	Qi	8186,49
Calor Disponible	Btu/Lb	Qd	8186,49

Tabla 40. Perdida De Calor Por Humedad En El Combustible Distral 3

Perdidas de Calor debidas a la Humedad en el Combustible (q2)			
$q_2 = \frac{W}{100} \cdot (h_{pv} - h_{wsat})$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Humedad en el Combustible	%	W	45,502
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	385,33
Temperatura del Aire Ambiente	°F	Ta	84,95
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	h _{pv}	1234,97
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	h _{wsat}	53,0075
Perdidas por Humedad Combustible	Btu/Lb	q2	537,81

Tabla 41. Perdida De Calor Por Humedad En El Aire De Combustión Distral 3

Perdidas de Calor debidas a la Humedad en el Aire de Combustion (q3)			
$q_3 = 0.46 \cdot da \cdot ma \cdot (T_g - T_a)$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Temperatura del Aire a entrar en la Caldera	°F	Ta	84,95
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	385,33
Humedad Relativa del Aire Ambiente	%	da	83
Libras de aire requerido por Libra de combustible con exceso (Real)	Lb/Lb	ma	16,39
Peso de vapor de agua por libra de aire a Temp. Ambiente	Lb/Lb	da	0,0216
Perdidas por Humedad en el Aire	Btu/Lb	q3	48,91

Tabla 42. Perdida De Calor Por Hidrogeno En El Combustible Distral 3

Perdidas de Calor debidas al Hidrogeno en el Combustible que forma Vapor de Agua (q4)			
$q_4 = \frac{9H}{100} \cdot (h_{pv} - h_{wsat})$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Entalpia de vapor a 1 psia y temperatura de gases de Combustion	Btu/Lb	h _{pv}	1234,97
Entalpia de liquido saturado a temperatura de aire ambiete	Btu/Lb	h _{wsat}	53,0075
Porcentaje de Hidrogeno en el Combustible	%	H	4,58
Perdidas por Humedad Combustible	Btu/Lb	q4	487,34

Tabla 43. Perdida De Calor Gases Secos En Chimenea Distral 3

Perdidas de Calor por Gases Secos en Chimenea (q5)			
$q_5 = W_g \cdot C_{pg} \cdot (T_g - T_a)$ $W_g = \frac{11 - CO_2 + 8 \cdot O_2 + 7 \cdot (N_2 + CO)}{3 \cdot (CO_2 + CO)} \cdot \left[\left(\frac{C}{100} - \frac{Hr \cdot Wr}{14500} \right) + \frac{S}{267} \right]$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Peso Gases Secos en Chimenea (Por libra de Combustible)	Lb/Lb	W _g	9,46
Calor Especifico Gases secos de Combustion	Btu/Lb°F	C _{pg}	0,24
Temperatura de Gases de Combustion	°F	Tg	385,33
Temperatura del Aire a entrar en la Caldera	°F	Ta	84,95
Perdidas en Gases de Salida	Btu/Lb	q5	682,07

Tabla 44. Perdida De Calor Por Combustión Incompleta Distral 3

Perdidas de Calor por Combustion Incompleta (q6)			
$q_6 = \left(\frac{CO}{CO + CO_2} \right) * C * 10190$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Dioxido de carbono	%	CO2	8,83
Cantidad de Monoxido de carbono	ppm	CO	120,33
Peso de Carbono en Gases de Combustion	%	C	43,43
Perdidas Combustion Incompleta	Btu/Lb	q6	6,02

Tabla 45. Perdida De Calor Por Combustible No Quemado Distral 3

PERDIDA POR COMBUSTIBLE NO QUEMADO o INQUEMADOS (q7)			
$q_7 = q_{rm} + q_{rp} + q_{rpr} + q_{rbp} + q_{rv}$ $q_7 = \sum Hr * Wr$ $Wr = \frac{A}{100 - Cr}$			
MULTICICLON			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crn	35,36
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrm	5079
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,931
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrm	544,61
PRECIPITADOR ELECTROESTATICO			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crp	0
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrp	0
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,93
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrp	0,00
PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crpr	15,68
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrpr	1404
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,93
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrpr	115,41
BAJO PARRILLA			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crpb	13,36
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrbp	864
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,93
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrv	69,12
RESIDUOS VOLANTES			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Porcentaje de Combustible no quemado (Inquemados)	%	Crv	0
Poder Calorico de los residuos	Btu/Lb	Hrv	0
Contenido de Ceniza en el Combustible	%	A	6,93
Perdida por Combustible no quemado	Btu/Lb	qrm	0,00
Perdidas por Inquemados	Btu/Lb	q7	729,14

Tabla 46. Perdidas Por Radiación Y Convección Distral 3

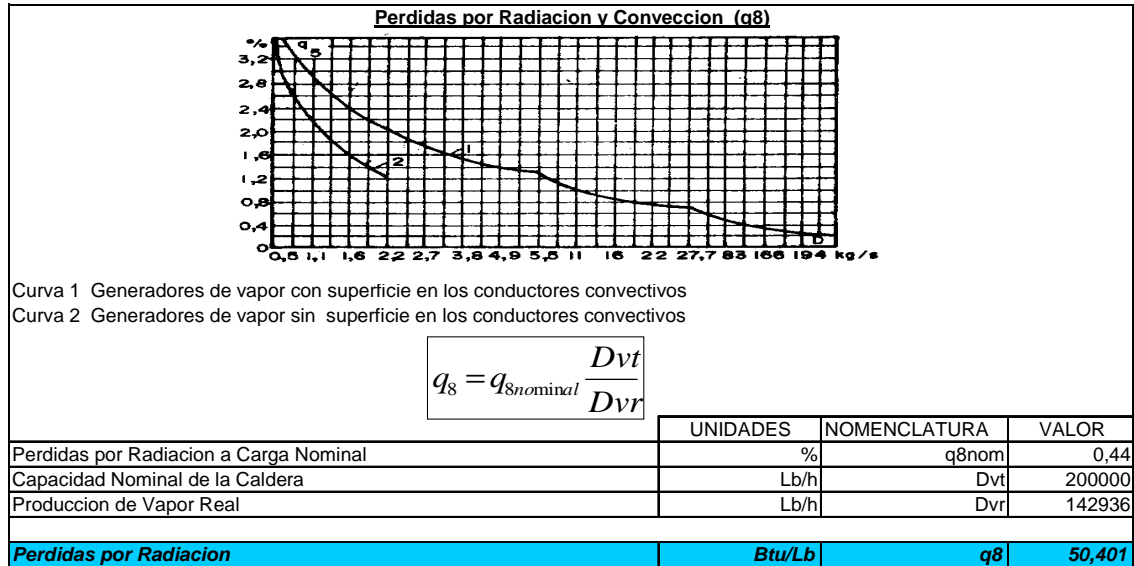


Tabla 47. Perdidas Por Purgas Distral 3

Perdidas por Purgas (q9)			
$q_9 = \frac{Dp^*(hls - haa)}{Df}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Flujo de agua extraida por purgas	Lb	Dp	17867
Presion Absoluta de Domo	psia	Pda	691,29
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	487,47
Presion Absoluta de agua de alimentacion	psia	Paa	985,14
Temperatura de agua de alimentacion	°F	Taa	227,2
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,612
Perdidas por Purgas	Btu/Lb	q7	58,52

Tabla 48. Perdidas Indeterminadas Distral 3

Perdidas Indeterminadas (q10)			
$q_{10} = 1.5\% * Q_D$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Calor Disponible	Btu/Lb	Qd	8186,49
Perdidas Indeterminadas	Btu/Lb	q10	122,80

Tabla 49. Calor Útil Distral 4

Calor Util (Q1)			
$Q_1 = \frac{D_v * ((h_v - h_{aa}) + (h_v - h_{er}))}{Q_f}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvr	357340
Presion Absoluta de Vapor Sobrecalentado	psia	Pvsa	649,49
Temperatura de Vapor Sobrecalentado	°F	Tvs	735,50
Presion Absoluta de Domo	psia	Pda	691,29
Entalpia del Vapor Sobrecalentado	Btu/Lb	hvs	1369,54
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,612
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	487,469
Entalpia del vaporsaturado (vapor saturado a P de domo)	Btu/Lb	her	1202,38
Calor Util	Btu/Lb	Q1	5406,89

Tabla 50. Gasto De Combustible Distral 3

Gasto de Combustible (Df)			
$D_f = D_{CARBON} + D_{BAGAZO} + D_{BAGACILLO}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Consumo de Carbon	Lb	Dcarbon	13220
Consumo de Bagazo	Lb	Dbagazo	66140
Consumo de Bagacillo	Lb	Dbagacillo	9140
Gasto de Combustible	Lb	Df	88500,00

Tabla 51. Gasto De Combustible Distral 3

EFICIENCIA INDIRECTA (η INDIRECTA)			
$\eta_{INDIRECTA} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10})$			
	NOMENCLATURA	Btu/Lb	%
Perdidas por Humedad en Combustible	q2	537,81	6,57
Perdidas por Humedad en Aire Combustion	q3	48,91	0,60
Perdidas por Hidrogeno (Forma Vapor Agua)	q4	487,34	5,95
Pedidas por Gases Secos en Chimenea	q5	682,60	8,34
Perdidas por Combustion Incompleta	q6	6,02	0,07
Perdidas por Combustible no quemado	q7	729,14	8,91
Perdidas por Radiacion y Conveccion	q8	50,40	0,62
Perdidas por Purgas	q9	58,52	0,71
Perdidas Indeterminadas	q10	122,80	1,5
TOTAL DE PERDIDAS	qtotal	2723,54	33,27
Calor Absorbido por la caldera (Calor Util)	Q1	5406,89	66,05
CALOR TOTAL	-	8130,43	99,32
Eficiencia Indirecta	%	nINDIRECTA	66,73

Tabla 52. Eficiencia Térmica Directa Distral 3

EFICIENCIA DIRECTA (η DIRECTA)			
$\eta_{DIRECTA} = \frac{D_v((h_{vs} - h_{aa}) + (h_{vs} - h_{sv})) + D_p(h_s - h_{aa})}{D_f * Q_D}$			
	UNIDADES	NOMENCLATURA	VALOR
Produccion de Vapor Real	Lb	Dvs	357340
Flujo de agua extraida por purgas	Lb	Dp	17867
Gasto de Combustible	Lb	Df	88500
Entalpia de Vapor Saturado a Presion de Domo	Btu/Lb	hls	1202,38
Entalpia del agua de caldera (liquido saturado a P de domo)	Btu/Lb	hls	487,47
Entalpia del vapor producido	Btu/Lb	hvs	1369,54
Entalpia del agua de alimentacion	Btu/Lb	haa	197,61
Poder calorifico Superior del combustible	Btu/Lb	Qd	8186
Eficiencia Directa	%	nDIRECTA	66,76
$\% ERROR = \frac{\eta_{INDIRECTA} - \eta_{DIRECTA}}{\eta_{INDIRECTA}} \times 100$			
%ERROR	%	-	-0,05

Como se puede observar el porcentaje de error entre la eficiencia directa e indirecta es del 0.05% lo que nos indica que la medición de flujo de combustibles es totalmente acertada para esta caldera. Los aislamientos térmicos en los ductos y paredes de esta caldera se encuentran en un buen estado.

Ya habiendo comprobado la efectividad en la medición de flujos de combustibles se realizaron pruebas de eficiencias utilizando el método de entrada salida en las calderas 1, 3 y 4, arrojando los siguientes resultados:

10.4 CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 1

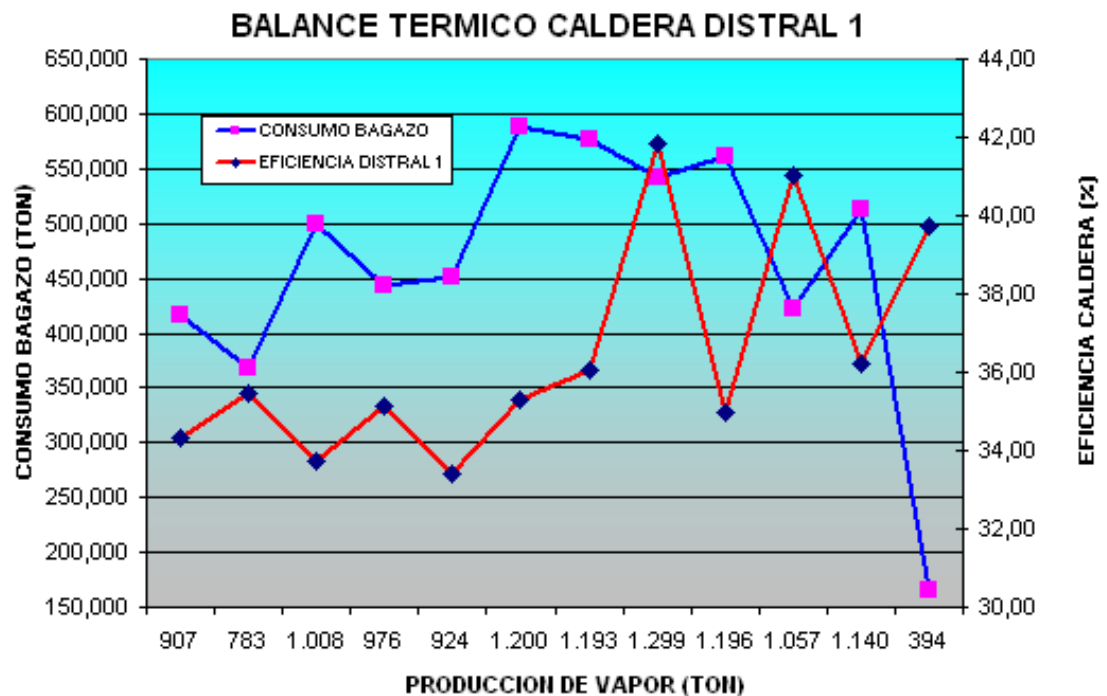
Se realizaron mediciones en 24 horas durante 12 días garantizando siempre con los operarios que los chutes se encontraran con carga durante cada prueba. El laboratorio de Incauca S.A. reporta las propiedades del bagazo haciendo un compuesto semanal tomando muestras diarias por lo que el poder calórico superior es un dato muy exacto del que se estaba quemando en cada día. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 53. Eficiencias Caldera Distral 1 Incauca S.A.

CALDERA DISTRAL 1															
BAGAZO (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	VAPOR GENERADO (LB)	VAPOR GENERADO (TON)	PURGA (TON)	PRESION VAPOR (PSI)	TEMPERATURA VAPOR (°F)	ENTALPIA VAPOR (BTU/LB)	PRESION AGUA ALIM. (PSI)	TEMPERATURA AGUA ALIM. (°F)	ENTALPIA AGUA ALIM. (BTU/LB)	PRESION DOMO (PSI)	ENTALPIA AGUA DOMO (BTU/LB)	ENTALPIA VAPOR DOMO (BTU/LB)	Lb. Vapor x Lb. Bagazo	EFICIENCIA CALDERA %
416,480	7750	1.813.776	907	45,34	266,92	583,33	1308,29	470,58	231,67	201,03	316,92	399,51	1203,78	2,18	34,33
368,060	7750	1.565.696	783	39,14	270,86	599,43	1316,71	469,57	180,33	149,46	320,86	400,77	1203,87	2,13	35,48
498,650	7750	2.015.728	1.008	50,39	268,75	580,67	1306,69	471,00	160,86	129,98	318,75	400,10	1203,82	2,02	33,72
443,350	7750	1.951.088	976	48,78	275,58	573,83	1302,39	462,83	205,58	174,76	325,58	402,27	1203,97	2,20	35,13
450,470	7750	1.847.664	924	46,19	267,00	573,58	1302,97	468,33	183,17	152,30	317,00	399,53	1203,78	2,05	33,40
588,660	7462	2.399.496	1.200	59,99	271,82	588,45	1310,68	466,91	169,57	138,68	321,82	401,08	1203,89	2,04	35,29
576,830	7462	2.386.472	1.193	59,66	270,67	589,42	1311,30	450,58	162,88	131,95	320,67	400,71	1203,89	2,07	36,04
542,320	7462	2.598.616	1.299	64,97	270,50	589,08	1311,13	444,50	160,50	129,56	320,50	400,66	1203,86	2,40	41,82
560,280	7462	2.391.072	1.196	59,78	270,67	580,00	1306,17	453,33	226,17	195,45	320,67	400,71	1203,86	2,13	34,98
423,150	7462	2.114.752	1.057	52,87	267,55	583,73	1308,46	460,64	228,55	197,86	317,55	399,71	1203,79	2,50	41,03
512,880	7462	2.280.496	1.140	57,01	276,75	585,25	1305,55	438,25	233,00	202,30	326,75	402,64	1204,00	2,22	36,19
164,720	7247	787.400	394	19,69	263,40	573,60	1303,28	482,60	239,00	208,45	313,40	398,37	1203,69	2,39	39,71
PROMEDIOS															
462,154	7564	2.012.688	1.006	50,32	270,039	583,36	1307,80	461,59	198,44	167,65	320,04	400,51	1203,85	2,19	36,43

Las eficiencias de esta caldera son realmente bajas, con una máximo de 41,82% y un promedio de 36,43%. Se buscaron las causas de esta baja eficiencia y finalmente se llego a la conclusión que al reducir vapor de 650psi proveniente de las calderas Distral 3 y 4 hasta 275psi, este vapor reducido llega con la presión mas alta que la de las calderas Distral 1 y 2 restringiendo su generación de vapor, pero estas siguen consumiendo igual cantidad de bagazo, lo que hace que se presenten altas perdidas de calor por combustible inquemado en las cenizas además de la poca generación de vapor. En la tabla 10-1 se observa que la generación promedio es de aproximadamente 1.000 ton de vapor cuando la capacidad nominal de esta caldera es de 1.800 ton de vapor

Figura 37. Balance Térmico Caldera Distral 1



En la figura 10-4 se puede observar como la eficiencia de la caldera baja cuando baja la producción de vapor y aumenta el consumo de combustible, el consumo de combustible debe ser proporcional a la producción de vapor para mantener proporcionalidad con la eficiencia de la caldera.

10.5 CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 3

Se realizaron mediciones en 24 horas durante 13 días garantizando siempre con los operarios que los chutes de bagazo se encontraran con carga durante cada prueba. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 54. Eficiencias Caldera Distral 3 Incauca S.A.

CALDERA DISTRAL 3																					
BAGAJO (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	BAGACILLO (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	CARBON (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	CONSUMO TOTAL COMBUSTIBLE (TON)	PODER CALORICO SUPERIOR MEZCLA (BTU/LB)	VAPOR GENERADO (LB)	VAPOR GENERADO (TON)	PURGA (TON)	PRESION VAPOR (PSI)	TEMPERATURA VAPOR (°F)	ENTALPIA VAPOR (BTU/LB)	PRESION AGUA ALIM. (PSI)	TEMPERATURA AGUA ALIM. (°F)	ENTALPIA AGUA ALIM. (BTU/LB)	PRESION DOMO (PSI)	ENTALPIA AGUA DOMO (BTU/LB)	ENTALPIA VAPOR DOMO (BTU/LB)	Lb. Vapor x Lb. Comb.	EFICIENCIA CALDERA %
464,640	7207	19,910	6747	154,22	10436	638,770	7972,248	4,806,688	2,403	120,17	653,540	780,86	1394,660	926,88	246,56	217,022	707,06	493,009	1201,730	3,762	65,33
461,700	7207	20,550	6747	148,27	11928	630,520	8302,175	4,606,528	2,303	115,16	640,810	781,97	1395,910	940,61	249,24	219,757	690,25	489,811	1202,110	3,653	60,87
435,490	7207	11,820	6747	147,74	10313	595,050	7969,025	4,475,656	2,238	111,89	651,610	777,15	1392,640	940,93	274,44	217,940	699,63	491,601	1201,900	3,761	65,08
472,280	7207	7,920	6747	125,12	11318	605,320	8050,727	4,504,192	2,252	112,60	639,350	779,08	1394,340	935,59	237,75	208,154	689,66	489,698	1202,120	3,721	64,35
506,700	7350	0,000	6948	128,07	11443	634,770	8175,796	4,492,160	2,246	112,30	621,17	759,17	1383,930	938,357	258,74	229,357	665,23	484,959	1202,650	3,538	58,37
441,830	7350	0,000	6948	127,16	10893	568,990	8141,803	4,291,232	2,146	107,28	657,29	760,55	1382,860	947,01	264,74	235,452	701,41	491,940	1201,860	3,771	62,12
395,280	7350	24,760	6948	122,63	11322	542,670	8229,232	4,201,056	2,101	105,03	659,82	762,33	1383,750	950,52	282,16	253,153	701,80	482,014	1201,850	3,871	62,30
448,120	7350	24,410	6948	127,01	10263	599,540	7950,739	4,272,800	2,136	106,82	653,92	773,22	1390,290	944,56	275,34	246,204	702,50	482,146	1201,830	3,563	60,27
406,260	7350	28,420	6948	139,88	10263	574,560	8039,302	4,408,544	2,204	110,21	649,68	723,04	1361,540	949,60	260,74	231,405	693,33	490,400	1202,040	3,836	62,16
480,110	7350	20,130	6948	141,32	10263	641,560	7979,049	4,235,520	2,118	105,89	655,46	759,41	1382,300	952,24	252,75	223,328	696,40	490,986	1201,970	3,301	55,96
428,530	7350	5,250	6948	112,80	11288	546,580	8158,840	4,206,912	2,103	105,17	649,68	761,17	1383,610	949,60	260,74	231,405	693,33	490,400	1202,400	3,848	63,51
451,490	7350	0,000	6948	146,45	10881	597,940	8214,827	4,533,664	2,267	113,34	648,27	759,53	1382,740	940,65	256,47	227,065	694,39	490,603	1202,020	3,791	62,28
350,130	7290	0,000	6895	128,58	11517	478,710	8425,359	3,607,456	1,804	90,19	661,00	786,17	1397,320	958,75	284,33	255,379	710,17	493,596	1201,650	3,768	60,35
PROMEDIOS																					
441,735	7301,385	12,552	6882,077	134,558	10932,923	588,845	8123,779	4357108,308	2178,554	108,928	649,354	766,435	1386,607	944,254	261,846	230,432	695,782	490,859	1202,010	3,707	61,766

Tabla 55. Porcentajes De Combustibles Alimentados Distral 3

% CARBON	% BAGAJO	% BAGACILLO
24,14	72,74	3,12
23,52	73,23	3,26
24,83	73,19	1,99
20,67	78,02	1,31
20,18	79,82	0,00
22,35	77,65	0,00
22,60	72,84	4,56
21,18	74,74	4,07
24,35	70,71	4,95
22,03	74,83	3,14
20,64	78,40	0,96
24,49	75,51	0,00
26,86	73,14	0,00
PROMEDIOS		
22,91	74,99	2,10

Las eficiencias de esta caldera se encuentran dentro de un rango aceptable ya que la eficiencia nominal utilizando solamente bagazo como combustible es del 66,02% el cual es el combustible de mayor flujo de alimentación en promedio 77,09% (bagazo y bagacillo) contra el 22,91% de alimentación promedio de Carbón.

Se encontró una eficiencia máxima del 65,33% que es prácticamente la eficiencia nominal; la eficiencia mínima que se encontró fue del 55,96%.

La capacidad nominal de esta caldera es de 2.400 toneladas de vapor diarias, y la máxima generación en un día pico fue de 2.403 con un consumo total de combustible de 638,770 toneladas, y fue el día en que se tuvo mas consumo de carbón, pero también mayor eficiencia.

10.6 CALCULO DE EFICIENCIAS DIRECTAS CALDERA DISTRAL 4

Se realizaron mediciones en 24 horas durante 8 días garantizando siempre con los operarios que los chutes de bagazo se encontraran con carga durante cada prueba. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 56. Eficiencias Caldera Distral 4 Incauca S.A.

CALDERA DISTRAL 4																				
BAGAZO (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	BAGACILLO (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	CARBON (TON)	PODER CALORICO SUP. (BTU/LB)	CONSUMO TOTAL COMBUSTIBLE (TON)	PODER CALORICO SUPERIOR MEZCLA (BTU/LB)	VAPOR GENERADO (LB)	VAPOR GENERADO (TON)	PURGA (TON)	PRESION VAPOR (PSI)	TEMPERATURA VAPOR (°F)	ENTALPIA VAPOR (BTU/LB)	PRESION AGUA ALIM. (PSI)	TEMPERATURA AGUA ALIM. (°F)	ENTALPIA AGUA ALIM. (BTU/LB)	PRESION DOMO (PSI)	ENTALPIA AGUA DOMO (BTU/LB)	ENTALPIA VAPOR DOMO (BTU/LB)	EFICIENCIA CALDERA %
352.12	7494	198.656	6933	275.63	10.564	826.406	8383.076	6.105.344	3.053	152.634	671.670	766.08	1385.30	944.08	182.50	152.74	726.67	496.68	1201.26	63.18
362.65	7494	310.236	6933	241.79	11.123	914.678	8263.029	6.252.060	3.126	156.302	677.500	774.00	1389.56	975.00	185.67	155.96	736.50	498.50	1201.01	59.53
373.00	7494	120.000	6933	190.47	11.965	683.470	8641.485	5.203.152	2.602	130.079	675.920	766.83	1385.52	960.75	178.56	148.84	723.33	496.06	1201.34	63.35
425.630	7494	65.960	6933	237.64	11.875	729.230	8870.928	6.084.160	3.042	152.104	764.780	671.67	1384.56	962.67	187.36	157.64	727.00	496.74	1201.25	67.11
498.651	7494	23.230	6933	247.79	10.984	769.671	8600.648	5.945.872	2.973	148.647	764.270	658.91	1384.91	955.18	174.64	144.91	706.27	492.86	1201.74	64.70
552.360	7494	0.000	6933	238.85	11.858	791.210	8811.402	5.885.760	2.943	147.144	765.580	660.00	1385.61	963.00	185.75	156.03	708.67	493.31	1201.69	60.38
325.650	7494	147.890	6933	248.76	11.458	722.300	8744.337	5.626.544	2.813	140.664	759.580	674.42	1381.42	973.25	191.08	161.39	721.92	495.80	1201.37	63.11
356.230	7494	156.620	6933	256.44	11.191	769.290	8612.167	6.090.576	3.045	152.264	765.500	674.17	1384.84	953.83	204.08	174.36	725.50	496.46	1201.28	64.82

Tabla 57. Porcentajes De Combustibles Alimentados Distral 4

% CARBON	% BAGAZO	% BAGACILLO	TOTAL BIOMASA
33,35	42,61	24,04	66,65
26,43	39,65	33,92	73,57
27,87	54,57	17,56	72,13
32,59	58,37	9,05	67,41
32,19	64,79	3,02	67,81
30,19	69,81	0,00	69,81
34,44	45,09	20,47	65,56
33,33	46,31	20,36	66,67
PROMEDIOS			
31,30	52,65	16,05	68,70

Las eficiencias de esta caldera se encuentran aceptables, ya que la eficiencia nominal utilizando solo bagazo como combustible es del 66,67% y los ingenieros de Incauca S.A. manejan un estimado de aproximadamente 72% para mezcla de combustible 70% bagazo y 30% carbón.

Se encontró una eficiencia máxima del 67,11% y la eficiencia mínima fue del 59,53%.

La capacidad nominal de esta caldera es 3.600 toneladas de vapor diarias, y la máxima generación en un día pico fue de 3,126 con un consumo total de combustible de 914,618 toneladas, el mayor de las pruebas y el de menor eficiencia.

11 PLANTEAMIENTO DE MEJORAS

El planteamiento de mejoras se enfoco en el consumo de carbón ya que este combustible es costoso y es contaminante, por lo que se debía reducir el consumo de este mineral, aumentando así el consumo de biomasa (bagazo y bagacillo); para ello se debían mejorar las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de carbón y mantenerlas siempre las mas estables posibles para liberar la misma energía del carbón pero con un consumo mucho menor.

11.1 PROPUESTA DE MEZCLAS DE CARBON

Con el fin de determinar las mezclas adecuadas de carbón para ser utilizadas como combustible en las calderas de la planta de INCAUCA S.A. se estudiaron las características fisicoquímicas de las diferentes minas de carbón y con base en esto se estableció un modelo aplicable que mantiene estables la combustión y el intercambio de calor, con un rendimiento económico superior.

Fue necesario determinar independientemente las características fisicoquímicas para cada mina. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los carbones (cada viaje presenta características diferentes), se utilizaron los promedios por minas para este análisis, aunque, por lo general, se encuentran en determinado rango.

Considerando el volumen de la bodega de carbón, se concluye que la única separación de minas que se puede hacer es entre los carbones de Valle y carretera. Por lo tanto fueron estos promedios los que se tuvieron en cuenta inicialmente:

Minas de Valle: Vitonas (El Descanso), Las Mercedes, Inducarbón

Minas de Carretera: Somineros, Coocarbon, Excarbon, Planterra

Al hacer esta separación y realizar el análisis sobre diferentes mezclas entre las minas de Valle y Carretera, se observo que la mina Vitonas (El Descanso) presenta mejores características que las otra minas pertenecientes al sector de Valle del cual hace parte dicha mina, por lo tanto se optó por hacer el análisis con muestras de esta solamente.

Resultado de los cuales se determino que al mezclar con el carbón de carretera en una relación de 3 a 2, es decir 1.5 a favor del carbón del Valle, se tienen unas características apropiadas para ser utilizado como carbón de alimentación (ver anexoD):

Tabla 58. Propiedades De Mezclas De Carbón Óptimas Vitonas - Carretera

% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5,35	18,82	24,71	2,37	11.994
4,70	21,02	30,52	2,21	11.524

Estos resultados se obtuvieron para pruebas experimentales realizadas los días 17 y 26 de marzo respectivamente.

Durante estos mismos días se hicieron pruebas mezclando el carbón del Valle suministrado por Propal (Las Mercedes e Inducarbón) con carbón de carretera, en la misma relación (1.5), obteniendo los siguientes resultados para las dos pruebas. Resultados que también son favorables para ser usados en las calderas (ver anexo D):

Tabla 59. Propiedades De Mezclas De Carbón Óptimas Valle (Propal) - Carretera

% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
4,65	20,13	31,91	1,87	11.797
3,75	22,21	29,8	2,18	11.235

En las dos pruebas, es decir, Vitonas-carretera y Valle (Propal)-carretera se obtuvieron valores que concuerdan con el rango de valores obtenidos en los análisis realizados al carbón de alimentación de las calderas donde los promedios son los siguientes (ver anexo E):

Tabla 60. Promedios Pruebas Mezclas Carbón Valle – Carretera

% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5,72	23,23	29,74	2,06	11.114

Promedio obtenido desde el mes de Mayo hasta el mes de Abril, donde se obtuvo un variado rango de valores para el poder calórico, que van desde 10245 BTU/lb, hasta un poder calórico de 12310 BTU/lb y en cuanto al porcentaje en volátiles se obtuvo un rango desde 22,18 hasta 33,52.

De acuerdo al consumo óptimo presentado por las calderas y teniendo en cuenta que para el Ingenio es más rentable económicamente tener un menor consumo de carbón manteniendo la operación de las calderas estables, se analizaron los

valores más acordes a dichas condiciones determinando que: el consumo óptimo de los combustibles para la caldera Distral 3, esta aproximadamente en 24,14% de carbón que equivale a 154,22 Ton con un poder calórico de 10.436 Btu/Lb, 72,74% de bagazo equivalente a 464,64 Ton y 3,12% es decir 19,91 Ton de bagacillo (Ver Tablas 54 y 55).

Para la caldera Distral 4 el consumo más adecuado es de 32,59% de carbón que equivale a 237.64 Ton, 58.37% de bagazo equivalente a 425,630 Ton y 9,05% es decir 65,960 ton de bagacillo (Ver tablas 56 y 57).

Estos consumos de carbón con una mezcla óptima de un poder calórico más alto podrían haber sido mucho mas bajo para la misma cantidad de energía requerida

Las anteriores condiciones del consumo de los combustibles mantienen en buen estado las condiciones de la combustión y por lo tanto del intercambio de calor, es rentable económicamente debido a que se tiene un mayor consumo de bagazo que es el combustible que no genera ningún costo adicional, ya que se considera un residuo para el Ingenio, y se cumple con la resolución 898 de 1995, referente a las “NORMAS DE CALIDAD DEL CARBÓN MINERAL” donde expresa que a partir de enero de 2006 el contenido de azufre de las mezclas de combustibles usados en las calderas debe ser menor a 1.5% para la zona pacifica a la cual pertenece el departamento del Cauca.

Esta norma se cumple teniendo en cuenta que el contenido de azufre del bagazo es aproximadamente cero y que el consumo óptimo de este combustible en las calderas promedio es de un 72,99%, mientras que el consumo de carbón es de aproximadamente 27,11% y posee un contenido de azufre promedio de 2%, lo que implica que en cada caldera se quema aproximadamente un 0,54% de azufre.

Para trabajar con esta mezcla de carbones, el ingenio puede reducir el consumo actual del carbón de Carretera supliéndolo con carbón del Valle, debido a que este último tiene un costo mas reducido y que de esta forma también se pueden obtener características apropiadas para el consumo en las calderas.

Es necesario tener en cuenta que al realizar la mezcla de carbones planteada y reducir el consumo de carbón de carretera que es mas costoso, se puede minimizar el costo total a cargo del Ingenio en aproximadamente \$ 165.967.178 mensuales; con relación al gasto actual, si solo compra carbón del Valle (Vitonas – El Descanso).

Debido a que aproximadamente la compra diaria de carbón es de 500 Ton, para usar las mezclas planteadas es necesario que Incauca S.A. compre una carga diaria de 264 Ton lo que equivale en viajes de carbón a 22 volquetas y reciba de Propal 3 volquetas y 6 mulas que equivalen a 36 y 204 Ton de Valle y carretera respectivamente.

11.1.1 Comprando Solo Carbón De Vitonas Y Carretera. Si Incauca S.A. solo comprara carbón de Vitonas como carbón del valle:

Carbón total: 11796,53583 Ton.

		MINAS	TONELADAS	PRECIO POR TONELADA		TOTAL
CAUCA	VALLE	VITONAS	3.140,80	Carbon	58.150	239.171.793,08
			2.422,07			184.440.678,09
			2.334,61	Transporte	18.000	177.780.551,50

Por lo tanto para Incauca:

TON DE CARBON PARA INCAUCA	
VALLE	CARRETERA
7.897,48	

PRECIO DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
601.393.022,68	

Carbón a cargo de Propal:

TON DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
2.617,05	4.636,94

PRECIOS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
161.848.784,36	481.245.147,28

Total:

VALLE	CARRTERA
10.514,53	4.636,94

VALLE	CARRTERA
763.241.807,03	481.245.147,28

Carbón total: 15.151,48 Ton.

Por lo tanto Incauca requiere comprar diario: 263,25 Ton.

Como las volquetas con carbón del Valle transportan una carga aproximada de 12 Ton:

Volquetas diarias: 21,94 \approx 22

TONELADAS PARA INCAUCA (VALLE)	
DIARIO	264
MENSUAL	7.920,00

COSTO PARA INCAUCA	
DIARIO	20.103.600,00
MENSUAL	603.108.000,00

Para mantener la relación de 1,5 donde Valle equivale a un 60% y carretera a un 40% del carbón total:

Valle 0,6	Carretera 0,4
9.090,89	6.060,59

Carbón mensual para Propal:

Valle: $7.920 + X = 9.090,89$

$X = 1.170,89$

Carretera: $X = 6.060,59$

	TONELADAS DE CARBON PROPAL	
	VALLE	CARRTERA
Mensual	1.170,89	6.060,59
Diario	39,03	202,02

Como las mulas equivalen aproximadamente a 34 Ton. y las volquetas a 12 ton:

Mulas y volquetas diarias Propal	
3,25	5,94

Redondeando se aproximan a 3 volquetas y 6 mulas:

Carbón Diario de Propal	36	204
Carbón Mensual de Propal	1080	6120

Carbón Diario de Cauca	264	
Carbón Mensual de Cauca	7.920,00	

Carbón Total Diario	300	204
Carbón Total Mensual	9000	6120

Generando una relación de: 1,471

Mensualmente

TONELADAS DE CARBÓN PARA INCAUCA	COSTO DE CARBÓN PARA INCAUCA
7.920,00	\$ 603.108.000,00

Si inicialmente se invertían:

\$ 769.075.178,04 - Valor de compra de Carbón mensual promedio de Incauca S.A.**

El ahorro con esta propuesta es de:

\$ 165.967.178,04 - Valor Compra promedio – Nuevo costo carbón Incauca S.A.

Otra opción para las mezclas planteadas es el caso en que el Ingenio compre tanto carbón del Valle como de carretera, minimizando el costo total a cargo de Incauca en aproximadamente \$145.052.978. Para ello es necesario comprar una carga diaria de 216 y 34 Ton de carbón de Valle y carretera respectivamente, lo que equivale a 18 volquetas y una mula. Por parte de Propal se hacen necesarias 7 volquetas y 5 mulas, es decir 84 y 170 Ton de carbón de Valle y de carretera, respectivamente.

** Valor Reportado por el departamento de Costos de INCAUCA S.A.

11.1.2 Reducción En La Compra De Carbón De Carretera. Inicialmente el carbón total que consume el Ingenio es: 15.151,48 Ton.

Carbón de Propal:

TONELADAS DE CARBON POR PROPAL	
VALLE	CARRTERA
2.617,05	4.636,94

Para mantener la relación de 1,5 Valle equivale a un 60% y carretera a un 40% del carbón total:

Valle 0,6	Carretera 0,4
9.090,89	6.060,59

Para valle 2.617,05+ X = 9,090,89; X= 6.473,83
 Para Carretera 4.636,94+ X = 6.060,59; X= 1.423,65

CAUCA		MINAS	TONELADAS	PRECIO POR TONELADA		TOTAL
		VITONAS	6.473,83	Carbon	58.150	492.982.243,98
	VALLE			Transporte	18.000	
	CARRTERA	COOCARBON	1.423,65	Carbon	76.530	182.241.152,74
				Transporte	51.480	

Por lo tanto para Incauca se tiene:

TONELADAS DE CARBON PARA INCAUCA	
VALLE	CARRTERA
6.473,83	1.423,65

PRECIO DE CARBON PARA INCAUCA	
VALLE	CARRTERA
492.982.243,98	182.241.152,74

Carbón de Propal:

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
2.617,05	4.636,94
TONELADAS MENSUALES	
VALLE	CARRTERA
9.090,89	6.060,59

PRECIOS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
211.993.436,20	561.806.695,58
COSTO MENSUAL	
VALLE	CARRTERA
704.975.680,18	744.047.848,32

CARBON DIARIO PARA INCAUCA	
VALLE	CARRTERA
215,79	47,45

Como las volquetas con carbón del Valle transportan una carga de 12 Ton y las mulas 34 Ton:

Para Incauca:

VOLQUETAS	MULAS
17,98	1,40

Lo que equivale a 18 volquetas y 1 mula.

	TONELADAS DE CARBON PARA INCAUCA	
	VALLE	CARRTERA
DIARIO	216,00	34,00
MENSUAL	6.480,00	1.020,00

Ahora para Propal:

CARBON DIARIO PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
87,24	154,56
VOLQUETAS	MULAS
7,27	4,55

Lo que equivale a 7 volquetas y 5 mulas por parte de Propal

	TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
	VALLE	CARRTERA
DIARIO	84,00	170,00
MENSUAL	2.520,00	5.100,00

Carbón Diario de Propal	84,00	170,00
Carbón Mensual de Propal	2.520,00	5.100,00

Carbón Diario de Cauca	216,00	34,00
Carbón Mensual de Cauca	6.480,00	1.020,00

Carbón Total Diario	300,00	204,00
Carbón Total Mensual	9.000,00	6.120,00

Generando una relación de: 1,471

MENSUALMENTE:

TONELADAS DE CARBON PARA INCAUCA	
VALLE	CARRTERA
6.480,00	1.020,00

COSTO DEL CARBON PARA INCAUCA	
VALLE	CARRTERA
493.452.000,00	130.570.200,00

TOTAL: \$ 624.022.200,00

Si inicialmente se invertían:

\$ 769.075.178,04 - Valor de de compra de Carbón mensual promedio de Incauca S.A.

El ahorro con esta propuesta es de:

\$ 145.052.978,04 - Valor Compra promedio – Nuevo costo carbón Incauca S.A.

Después de presentar las propuestas de mezclas de carbón, el Ingeniero Jefe de Calderas de Incauca S.A. decidió probar dichas mezclas de acuerdo a la existencia de carbón en bodega diariamente y de su procedencia. Se tomaron muestras de carbón de alimentación y se arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 61. Análisis Carbón Alimentación – Mezclas Propuestas

IDENTIFICACION MUESTRA	% HUMEDAD	% CENIZAS	PODER CALORICO Btu/Lb	% AZUFRE
<i>30 de Mayo</i>	4,26	19,17	11.632	1,66
<i>05 de Junio</i>	5,55	21,60	11.264	2,30
<i>6 de Junio</i>	4,33	19,17	11.547	2,22
<i>7 de Junio</i>	4,75	18,21	11.965	2,06
<i>9 de Junio</i>	3,65	17,77	11.875	2,27
<i>10 de Junio</i>	4,40	24,02	10.984	3,17
<i>11 de Junio</i>	4,90	25,04	10.858	2,69
<i>12 de Junio</i>	4,40	21,52	11.458	3,82
<i>13 de Junio</i>	4,70	23,30	11.191	3,50

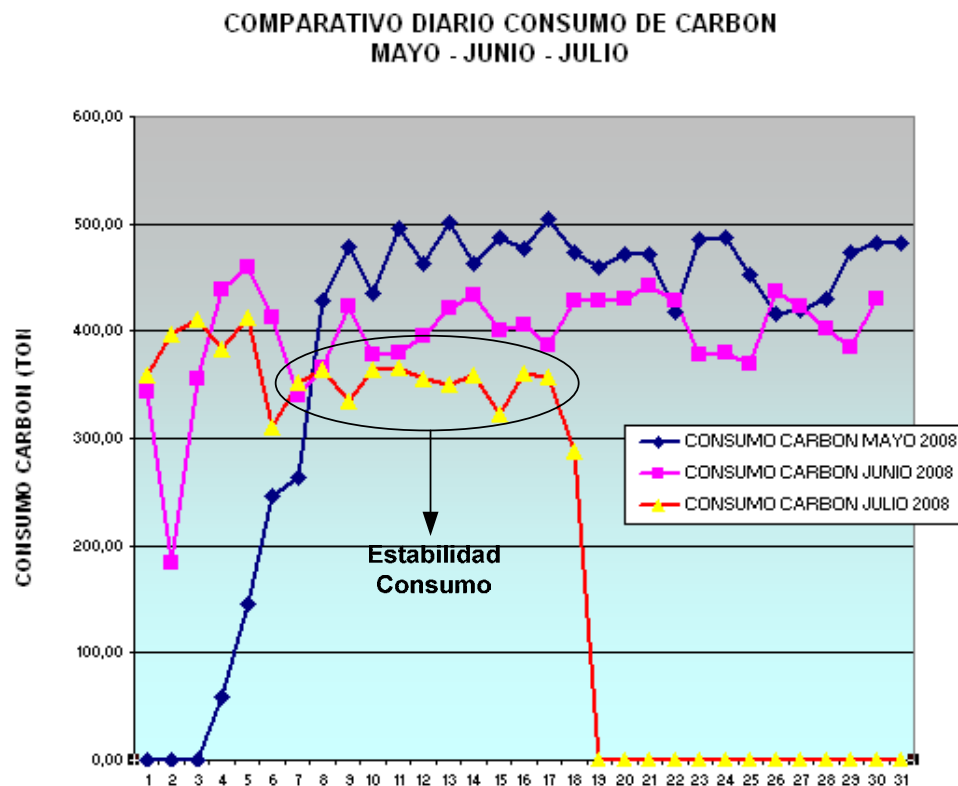
Se puede observar claramente como las mezclas han sido efectivas en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas. Se encontraron humedades máximas 5,55% la cual es bastante buena, las cenizas un máximo 25,04% la cual es un poco alta y el poder calórico un máximo de 11.965 Btu/Lb y un mínimo 10.858 Btu/Lb. El laboratorio de Incauca especifica valores máximos para determinar una buena mezcla de carbón para la humedad de 6% y para las cenizas de 18%. Pero la característica más importante que es el poder calórico se encuentra en la mayoría de los análisis dentro del rango estimado para evitar que el carbón eleve demasiado la temperatura de las parrillas[¶] y se pierda la efectividad de dicho combustible, este rango está estimado entre 10.900 Btu/Lb y 11.900 Btu/Lb.

11.2 CONSUMO DE CARBON EN CALDERAS

Desde que se implementó la medición de consumo de carbón se dio primero orden de quemar más biomasa que carbón debido a los altos consumo de carbón que se estaba presentado. Una vez se estableció la mejora en la mezcla de carbón de alimentación el consumo bajó significativamente una vez más. Los cambios presentados se reflejan en la siguiente grafica:

[¶] Parte baja del hogar de la caldera donde se quema el carbón

Figura 38. Comparativo Diario Consumo De Carbón – Mayo, Junio Y Julio



En el grafico 11-1 se puede observar claramente como en el mes de Mayo los consumos de carbón tienen picos de hasta de mas de 500 toneladas día, ya que en este mes se estaba iniciando con las mediciones y comprobando que el método funcionara no se tomaron acciones correctivas. Los datos de consumo desde el 1 hasta el 8 de Mayo representan consumos bajos ya que el ingenio se encontraba en el paro de mantenimiento anual desde el día 23 de Abril hasta el día 4 de Mayo, y al empezar a arrancar toda la fabrica los consumos de combustibles son pocos por la poca demanda de vapor. En promedio se consumieron diariamente aproximadamente 450 toneladas.

Se observa una disminución significativa del consumo diario de carbon desde el mes de Mayo que fue de un promedio de 450 toneladas a aproximadamente 400 toneladas en el mes de Junio, esta disminución es consecuencia de la implementación de un control de consumo en cada caldera y así poder responsabilizar a el operario encargado de este aumento.

En el mes de Julio a los 18 días en que se alcanzaron a tomar mediciones se sigue observando una tendencia a baja de consumo de carbón, con un promedio aproximado de 370 toneladas.

El Ingenio antes de este tipo de control manejaba un estimado de consumo diario de 400 toneladas máximo.

En el mes de Julio se puede observar como las acciones correctivas han logrado una estabilidad en el consumo de carbón diario.

Otro parámetro que hay que tener en cuenta en los consumos de combustibles en el caso del carbón es la generación de vapor por consumo de este combustible, ya que una alta generación puede indicar un alto consumo (Ver Anexo F).

Figura 39. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Mayo 2008

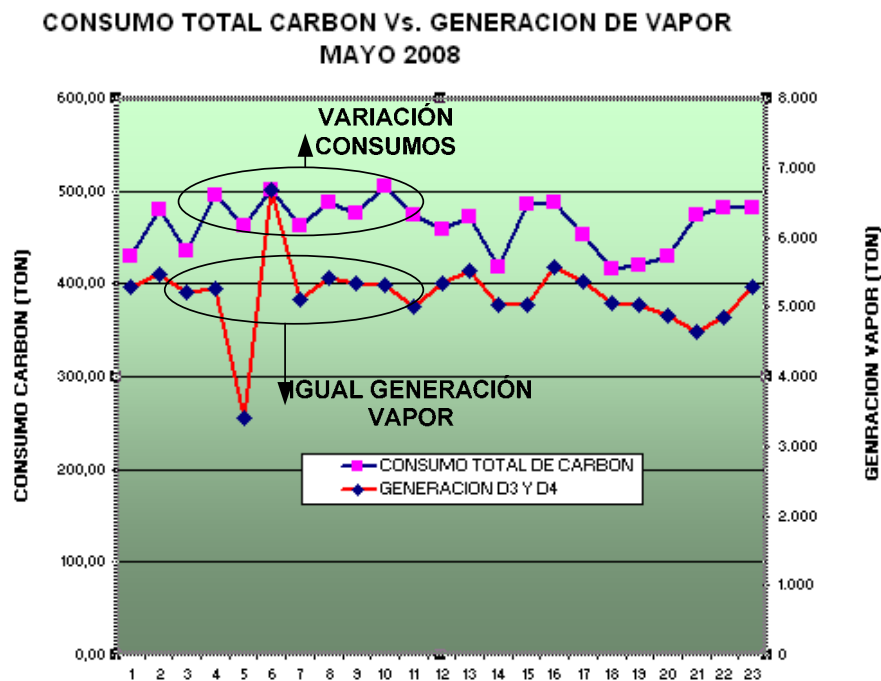


Figura 40. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Junio 2008

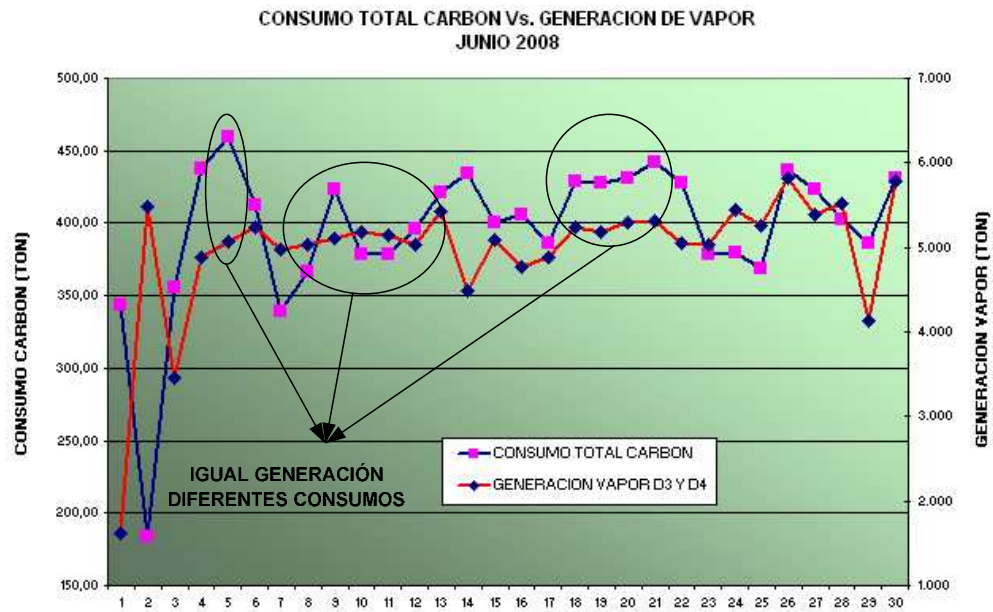
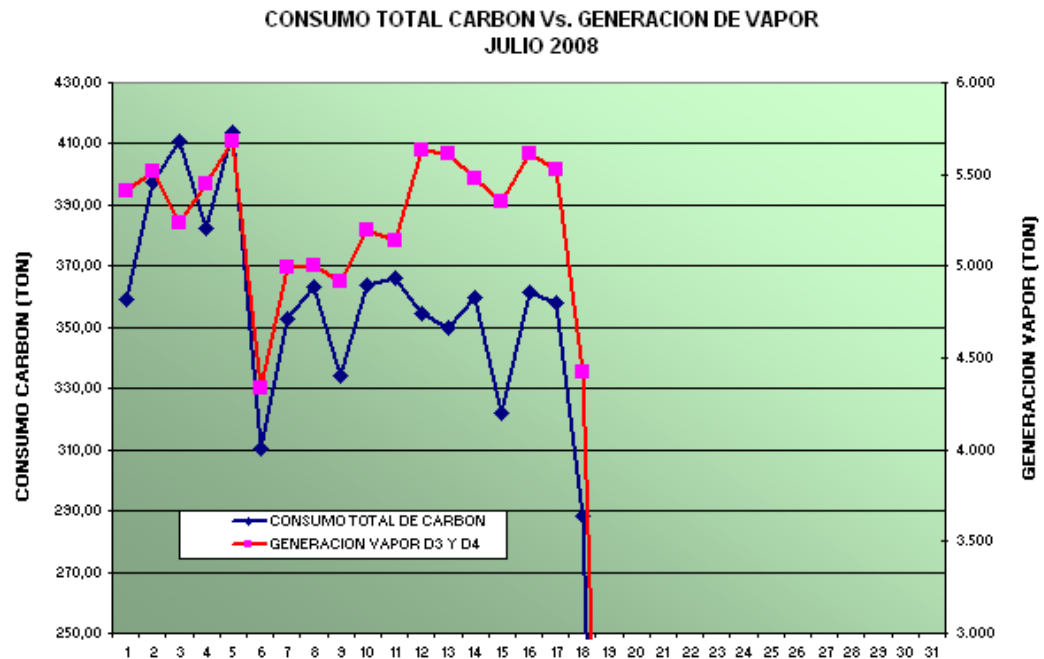


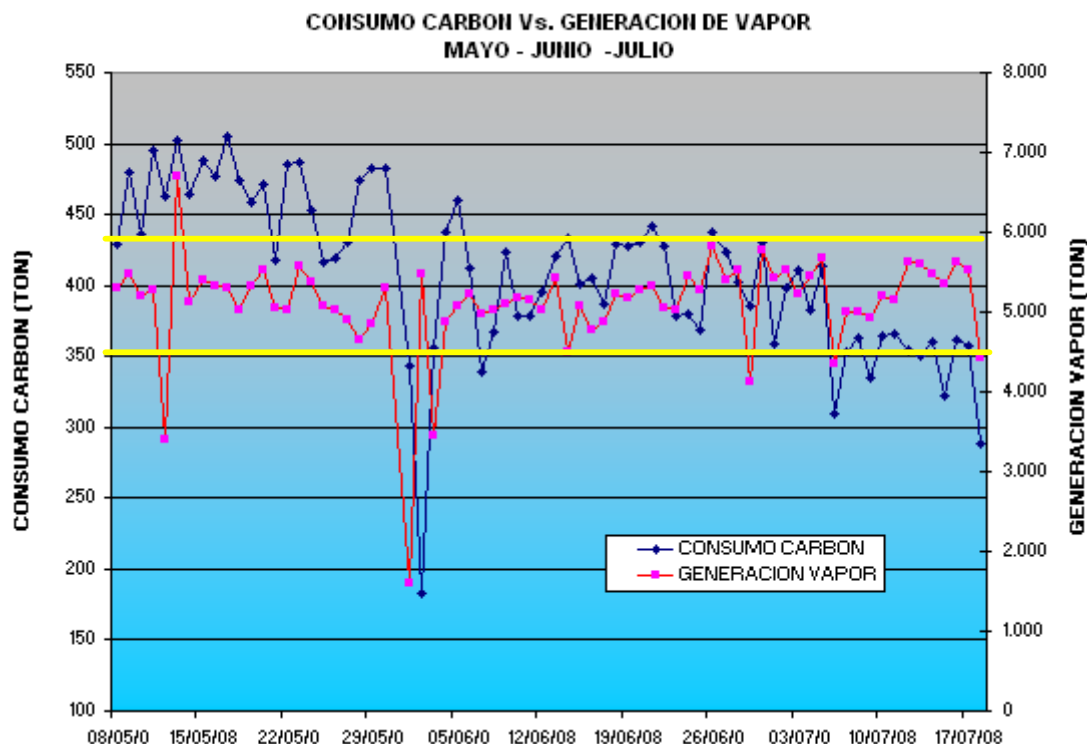
Figura 41. Consumo Carbón Vs. Generación Vapor –Julio 2008



Entre los meses de Mayo y Junio se presenta una alta variabilidad de consumo de carbón para generaciones de vapor iguales o similares. En el mes de Julio se

observa un comportamiento proporcional de consumo de carbón a medida que aumenta o disminuye la generación de vapor. (Ver anexo F)

Figura 42. Tendencia Consumo Carbón Vs. Generación Vapor



Las líneas amarillas delimitan la figura 11-5 dentro de los rangos de producción de vapor en operación normal, y claramente se observa como se ha disminuido el consumo de carbón a partir de la mitad del mes de Junio hasta la fecha de toma de datos (18 Julio). Esta disminución es debida a la mejora en la mezcla de carbón y además en el aumento sustancial en la quema de biomasa (bagazo y bagacillo).

12 ANALISIS ECONOMICO

El enfoque de este trabajo de grado estaba dado en el control y la disminución de consumo de energéticos que alimentan las calderas de Incauca S.A. teniendo la mayor eficiencia térmica posible, trabajando con bajos costos de operación y cumpliendo con las normas ambientales vigentes para la operación de calderas industriales. El consumo de biomasa residuo del proceso de molienda de la caña de azúcar, este subproducto no es considerado un gasto como combustible dentro de la empresa. El carbón por el contrario del bagazo representa uno de los gastos mas altos dentro de toda la empresa además que sus residuos de combustión son altamente contaminantes.

Este análisis económico esta enfocado en el ahorro en el consumo de carbón y sus costos desde la implementación de las diferentes acciones correctivas hasta la fecha de redacción de este documento.

Se dividió la generación de vapor diaria sobre el consumo de carbón diario de cada mes (Ver anexo G) y se hallo para cada día Ton. Vapor x Ton. Carbón, se saco el valor promedio por cada mes (Mayo, Junio y Julio) y se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 62. Toneladas Vapor x Toneladas De Carbón – Mes A Mes

MES	TON. VAPOR/TON. CARBON
MAYO	11,17
JUNIO	12,87
JULIO	14,71

Se observa un aumento de 1,70 toneladas de vapor por tonelada carbón de Mayo a Junio y de unas 1,84 toneladas de vapor por tonelada de carbón de Junio a Julio. De Mayo a Julio se observa un aumento de generación de vapor de 3,54 toneladas por tonelada de carbón.

Si se hubieran tenido las mismas propiedades fisicoquímicas y la misma relación de quema de combustibles entre el carbón y el bagazo se hubiera consumido el siguiente carbón en los meses de Mayo y Junio:

➤ Ahorro de carbón entre Mayo y Junio:

Tabla 63. Ahorro En Consumo De Carbón – Mayo Y Junio

MES	GENERACION VAPOR TOTAL MES	CONSUMO CARBON TOTAL MES	CARBON RELACION MAYO	DIFERENCIA AHORRO
JUNIO	149.318	11.888,02	13.372,74	1.484,71

Durante el mes de Junio no se realizaron modificaciones a la mezcla de carbón en bodega, por lo que la relación de consumo de carbón Carretera y Valle seguía siendo 1:1; por lo que el costo aproximado de una tonelada de carbón de alimentación sería el siguiente:

Tabla 64. Costo Carbón Por Minas

	MINAS	COSTO POR TONELADA \$ PESOS
VALLE	VITONAS	\$ 76.150,00
	LAS MERCEDES	\$ 84.038,90
	INDUCARBON	\$ 79.497,67
	YOLANDA	\$ 82.339,75
PROMEDIOS	-	\$ 80.506,58
CARRETERA	COOCARBON	\$ 128.010,00
	PLANTERA	\$ 138.375,81
	SAN FERNANDO	\$ 111.319,17
	SOMINERO	\$ 126.484,80
	EXCARBON	\$ 124.210,17
PROMEDIOS	-	\$ 125.679,99

Siendo la relación de mezcla 1 a 1 entre carbones de Valle y Carretera, una tonelada de carbón de alimentación utilizando los valores promedios de costos de las minas de cada región tendría un costo aproximado de **\$ 103.093,29**.

Al haber disminuido la quema de carbón en calderas habiendo aumentado la quema de biomasa en el mes de Mayo se consumieron **1.484,71** toneladas menos de carbón lo que representa un ahorro en el mes de Junio de **\$ 153.063.990,11**.

Ahorro de carbón entre Junio y Julio:

Tabla 65. Ahorro En Consumo De Carbón – Junio Y Julio

MES	GENERACION VAPOR TOTAL MES	CONSUMO CARBON TOTAL MES	CARBON RELACION JUNIO	DIFERENCIA AHORRO
JULIO	94.510	6.447,17	7.343,42	896,25

Durante el mes de Julio se realizaron modificaciones a la mezcla de carbón en bodega, por lo que la relación de consumo de carbón Valle y Carretera se modificó a 1,5:1; una tonelada de carbón de alimentación utilizando los valores promedios de costos de las minas de cada región tendría un costo aproximado de **\$95.564,38**.

Con el aumento de la quema de biomasa y con la mezcla de carbón propuesta se habían consumido hasta el 18 de Julio de 2008 **896,25** toneladas menos de carbón lo que representa un ahorro en el mes de Julio de **\$ 85.649.655,27**.

El ahorro que ha tenido el ingenio con las medidas adoptadas ha sido en total en los meses de Junio y Julio de **\$ 227.535.383,57**, una bastante significativa.

13 CONCLUSIONES

- En Incauca S.A. y en los ingenios azucareros en general el proceso de generación de vapor es uno de los procesos más importantes ya que este tipo de industria necesita altas cantidades de vapor para sus procesos productivos, por lo que es necesario tener un estricto control sobre todas las variables de operación y sus costos.
- El agotamiento de combustibles fósiles como lo son el carbón y el petróleo, hacen que la industria este buscando fuentes de energía renovables como lo es la biomasa de residuos agrícolas, en el caso de los ingenios azucareros el bagazo de caña de azúcar, la disminución significativa en los consumos de carbón que se lograron con este trabajo hacen que se cumpla con este objetivo.
- Al consumir menos carbón estamos desechando menos material contaminante hacia nuestro medio ambiente y estamos cumpliendo a cabalidad con las normas ambientales vigentes de nuestro país. Esto se ve representado en las bajas emisiones de Dióxidos de Azufre que presenta la caldera Distral 4 (108ppm) y la Distral 3 (225ppm) y Óxidos de Nitrógeno (140ppm y 157ppm respectivamente) la cual se encuentra dentro de la Norma Local del decreto 02 de 1982 para emisiones de SO₂ asociada a la altura mínima de la chimenea (Ver Anexo).
- Se ha alcanzado un ahorro en consumo de carbón de **2.380,96** toneladas de carbón que representan un ahorro de **\$ 227.535.383,57**, el cual es un ahorro bastante significativo para la empresa.
- Al realizar la comparación entre el Método de las Perdidas y El Método Directo para el cálculo de la eficiencia energética de las calderas 3 y 4, se hallaron porcentajes de error de 3,09% y 0,05%, lo cuales nos indican la veracidad del método utilizado para el cálculo de consumo de combustibles.
- La eficiencia térmica tomada en la caldera Distral 4 en un pequeño periodo de tiempo (2,5 horas), nos arroja una alta eficiencia del 70,33% para el cálculo de Perdidas y de un 67% para el cálculo directo, esto fue debido a que el aire de combustión era acorde para el combustible que estaba siendo alimentado durante la prueba; el bajo porcentaje de oxígeno en los gases 7.97%, con un exceso de aire del 59.09%, hace que las principales pérdidas de calor, pérdidas por gases secos, pérdidas por combustible Inquemado y pérdidas por combustión incompleta sean bajas.

- La eficiencia térmica tomada en la caldera Distral 3 en un pequeño periodo de tiempo (2,5 horas), nos arroja una alta eficiencia del 66.73%, eficiencia bastante alta teniendo en cuenta el alto porcentaje de oxígeno en los gases 11.83%, con un coeficiente de exceso de aire de 125.23%, esto indica que la eficiencia de esta caldera podría ser aun mas alta con el adecuado manejo del aire de combustión.
- La caldera Distral 1 presenta una muy baja eficiencia, en promedio 36,43%, debido a que de la línea de 650psi que es alimentada por las calderas Distral 3 y 4 se reduce vapor hasta 275psi y al ir con mayor presión en la mayoría del tiempo se restringe la generación de las caleras 1 y 2, pero estas siguen consumiendo igual cantidad de bagazo, lo que hace que se presenten altas perdidas de calor por combustible inquemado en las cenizas además de la poca generación de vapor.

14 RECOMENDACIONES

- ♦ Optimización de la relación aire/combustible mediante pruebas de combustión y elaborar curvas de CO Vs. O₂ (Ver Anexo x) para establecer los niveles óptimos de excesos de O₂ para garantizar una optima combustión a diferentes cargas, consumo de combustibles y aperturas de dampers de los ventiladores.
- ♦ Instalación de economizadores para precalentar el agua de alimentación de las calderas y así disminuir las pérdidas en gases secos de chimenea.
- ♦ El calor de las purgas continuas de todas las calderas es totalmente desaprovechado, ya que este vapor saturado es arrojado al medio ambiente, se podría pensar en un economizador o un secador de bagazo o carbón.
- ♦ Revisar los aislamientos térmicos en los ductos y paredes de cada una de las calderas.
- ♦ Realizar pruebas de eficiencias térmicas indirectas periódicamente para determinar cuales son las pérdidas de calor más altas e identificar sus posibles causas.
- ♦ Aunque el sistema de medición de consumo de carbón implementado funciona, lo mejor es tener instrumentación de medición directa como lo son los Weightometros.
- ♦ En lo posible no reducir vapor de la línea de 650psi a 275psi y así evitar la restricción de generación de vapor de las calderas Distral 1 y 2; de esta manera garantiremos que la generación de vapor sea directamente proporcional al consumo de combustible.

BIBLIOGRAFIA

BERMUDEZ, Edgar. Eficiencia de la Caldera Piro-tubular Colmaquinas de 250 BHP de un Laboratorio farmacéutico. Santiago de Cali, 2005. 70 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería.

Boletín Diario de la RMA [en línea]. El Ortigal, Miranda: CENICAÑA, 2008. [Consultado 04 de Julio de 2008]. Disponible en Internet: www.cenicaña.org

BORROTO, Aníbal. Ahorro de Energía en Sistemas de Vapor. Cuba, Universidad de Cienfuegos, 2002. 118 p.

CENGEL, Yunus y BOLES Michael. Termodinámica. Vol. 1. 4 ed. México: Mac. Graw Hill., 2002. 828 p.

INDUSTRIAS INAROCA. Caldera Piro-tubular 300 BHP [en línea]. Venezuela: Industrias Inaroca, 2008. [Consultado 14 Abril de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.inaroca.com.ve/Productos0203.htm>

LIFSCHITZ, Edgardo. Calderas 1 AADECA No.2 Vol.1 [en línea]. Argentina: Aadeca, 1993. [Consultado 15 Marzo 2008]. Disponible en Internet: http://www.aadeca.org/biblioteca/libro_pag3.php

Manuales de Operación y Mantenimiento Calderas Distral 1-4. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., 1982-1994. 4 v.

Manual de Procesos División Elaboración. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. 85h.

RODRIGUEZ GUERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuo-tubulares Industriales. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007. 98 Diapositivas.

R611001 Proceso Generación de Vapor. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A. Junio 2002. 39h

R612002 Preparación y Alimentación de Caña para los Molinos. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. 25h.

R612003 Molienda de Caña. El Ortigal, Miranda: INCAUCA S.A., Junio 2002. 33h.

ANEXOS

Anexo A. Principio De Funcionamiento De Los Weightometros

PESAJE DINÁMICO EN TRANSPORTE DE SÓLIDOS



El pesaje dinámico en transporte de sólidos se realiza con una balanza de correa denominada “pesómetro”, que se ha convertido hoy en un importante activo en los procesos productivos, ayudando a maximizar el uso de materiales sólidos a granel, control de inventario y a la fabricación consistente de productos.

Un pesómetro está compuesto por una estación de pesaje montada en la cinta donde se transporta el producto y un medidor de velocidad, entregando una señal al integrador que calcula la velocidad de la cinta transportadora, el flujo másico y el peso totalizado.



CALIBRACIÓN

Existen básicamente tres métodos de calibración: masas patrones estáticas, cadena de calibración y test con material.

Las masas patrones son el método más simple. Sin embargo, no consideran los efectos mecánicos del traspaso del peso del material a través de la cinta transportadora.

La cadena de calibración, como su nombre lo indica, es una cadena calibrada en peso y que se instala en la zona del pesómetro, simulando el efecto del paso del producto en la cinta transportadora.

Sin embargo, la calibración con material es el mejor método para graduar un pesómetro, ya que considera todos los efectos reales del producto en la cinta transportadora. Este consiste en pesar en una báscula estática, una cantidad predefinida de producto, el que se hace pasar por el pesómetro. Además, es el único método reconocido por el NIST (National Institute of Standard and Technology) y la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) para certificar estos instrumentos.

Anexo B. Carta Psicrometrica Del Aire

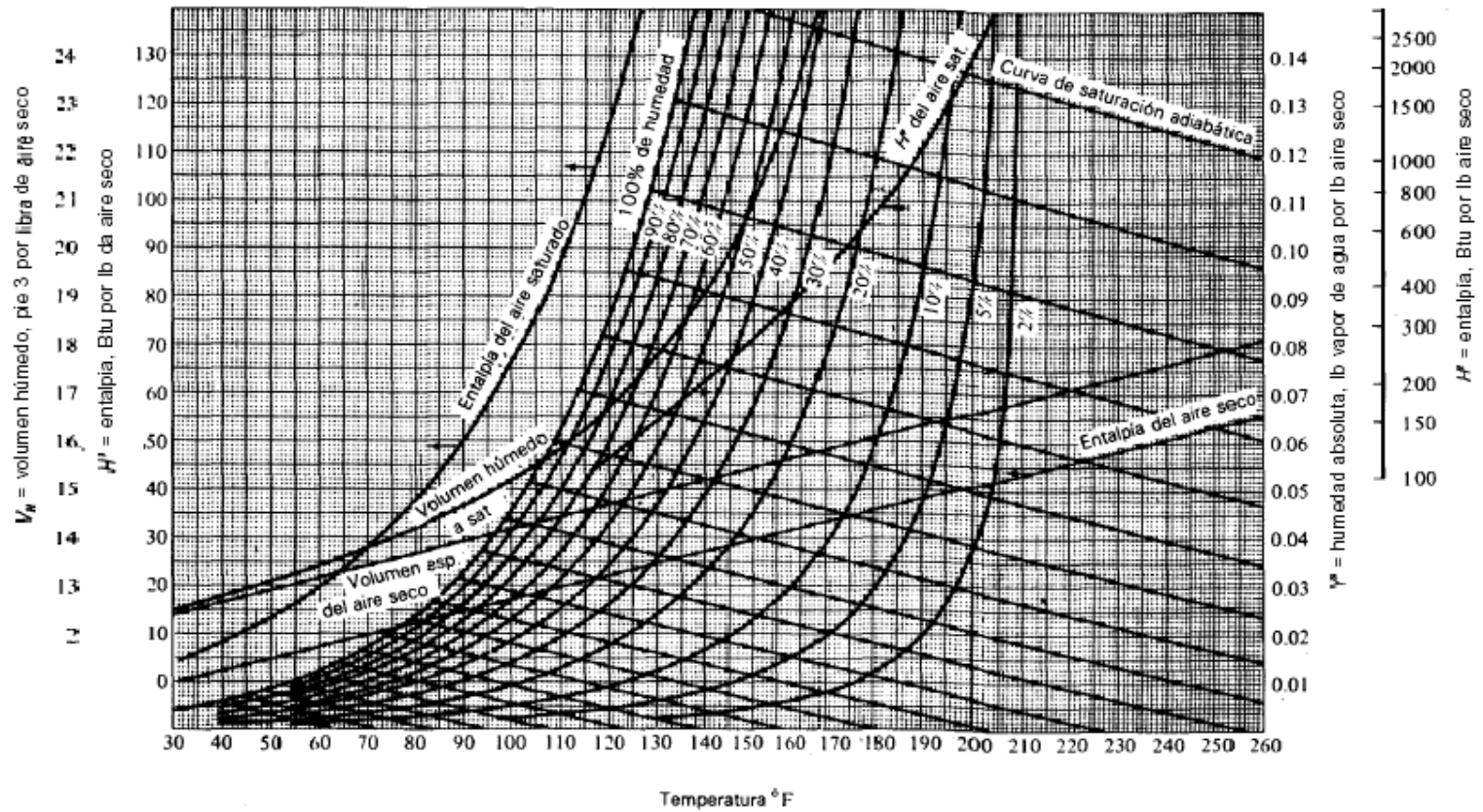


Figura 7.5(b) Carta psicrométrica para el aire-vapor de agua, 1 atm std abs., en unidades inglesas de ingeniería.

Anexo C. Código De Pruebas De La Asme “Asme Power Test Codes”

La **salida** (“output”) se define como el calor absorbido por el fluido de trabajo.

Los **créditos** son aquellas cantidades de energía que entran a las fronteras del generador de vapor, adicionalmente a la energía química (poder calorífico superior) del combustible tal como se quema (“as fired”). Estos créditos incluyen cantidades tales como el calor sensible en el combustible, en el aire de entrada, en el vapor de atomización, así como el calor que se genera a partir de la potencia consumida por los pulverizadores, ventilador de aire primario y de recirculación, bomba de circulación etc.

La **capacidad** del generador de vapor se define como la evaporación real en libras de vapor por hora entregada, o en Btu por hora de calor absorbido por el fluido de trabajo.

La eficiencia térmica del generador de vapor determinada por el Método de Entrada-Salida es la eficiencia bruta (“gross efficiency”), la cual se define como la relación entre el calor absorbido por el fluido de trabajo y el calor de entrada. Esta definición no incluye la energía requerida por los equipos auxiliares externos al sistema.

MÉTODO ENTRADA-SALIDA

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} \cdot 100 \quad 5.1$$

$$\text{Eficiencia (\%)} = [(\text{Calor absorbido}) / (\text{Calor en el combustible} + \text{créditos térmicos})] \cdot 100$$

MÉTODO DE LAS PÉRDIDAS

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Entrada}} \cdot 100 = \left[1 - \frac{\text{Pérdidas}}{\text{Entrada}} \right] \cdot 100 \quad 5.2$$

$$\text{Eficiencia (\%)} = 100 - [(\text{Pérdidas térmicas}) / (\text{Calor en el combustible} + \text{créditos térmicos})] \cdot 100$$

Para combustión combinada de varios combustibles se requieren consideraciones específicas.

Prueba abreviada de eficiencia (Código ASME).

La prueba abreviada según ASME considera sólo las principales pérdidas térmicas y la energía química (poder calorífico superior) del combustible. Este tipo de prueba se recomienda para evaluaciones de rutina de generadores de vapor de cualquier capacidad, pruebas de aceptación (garantía) de generadores de vapor pequeños para calefacción, así como para generadores de vapor industriales.

Las pérdidas de calor que se consideran en la prueba abreviada son:

1. Pérdidas en gases secos.
2. Pérdidas por humedad en el combustible.
3. Pérdidas por vapor de agua formado por combustión del hidrógeno.
4. Pérdidas de calor por combustible en los residuos.
5. Pérdidas de calor por radiación.
6. Pérdidas indeterminadas.

Eficiencia por el Método de las Pérdidas.

1. Pérdidas en gases secos. L_g

Primeramente se calculan las libras de gases secos por libra de combustible, W_g .

$$W_g = \frac{11 \cdot CO_2 + 8 \cdot O_2 + 7 \cdot (N_2 + CO)}{3 \cdot (CO_2 + CO)} \cdot \left[\left(\frac{C}{100} - \frac{Hr \cdot Wr}{14500} \right) + \frac{S}{267} \right], \text{ lb/lb} \quad 5.3$$

Donde:

CO_2, O_2, CO, N_2 - Contenido volumétrico de CO_2, O_2, CO y N_2 en los gases de combustión, %.

C, S - contenido de Carbono y Azufre en el combustible tal cual se quema, %.

Hr - Poder calorífico de los residuos (promedio ponderado), Btu/lb.

Wr - Lb de residuos secos por lb de combustible lb/lb.

$$L_g = W_g \cdot C_{pg} \cdot (T_g - T_a), \text{ Btu/h} \quad 5.4$$

Donde:

C_{pg} - Calor específico de los gases secos. En la prueba abreviada se toma $C_{pg} = 0.24$ Btu/lb.

T_g - Temperatura de gases a la salida del generador de vapor, °F.

T_a - Temperatura del aire tomada como referencia, °F.

2. Pérdidas por humedad en el combustible, L_{wet}

$$L_{wet} = \frac{W}{100} \cdot (h_{pv} - h_{wsat}), \text{ Btu/lb} \quad 5.5$$

Donde:

W - Humedad en el combustible, %.

h_{pv} - Entalpía del vapor a 1 psia y temperatura de gases de salida, Btu/lb.

h_{wsat} - Entalpía de líquido saturado a la temperatura de referencia (aire), Btu/lb.

3. Pérdidas por vapor de agua formado por combustión del Hidrógeno, L_H

$$L_H = 9 \cdot \frac{H}{100} (h_{pv} - h_{wat}), \text{ Btu/lb} \quad 5.6$$

Donde:

H - Hidrógeno en el combustible, %.

h_{pv} - Entalpía de vapor a 1 psia y temperatura de gases de salida, Btu/lb.

h_{wat} - Entalpía de líquido saturado a la temperatura de referencia (aire), Btu/lb.

4. Pérdidas de calor por combustible en los residuos, L_{CR}

$$L_{CR} = H_r \cdot W_r, \text{ Btu/lb} \quad 5.7$$

Donde:

H_r - Poder calorífico de los residuos (promedio ponderado), Btu/lb.

W_r - Peso de residuos secos por lb de combustibles, lb/lb. Si no se conoce se puede estimar.

$$W_r = \frac{A}{100 - C_R}, \text{ lb/lb} \quad 5.8$$

Donde:

A - Contenido de ceniza en el combustible, %.

C_R - Contenido de combustible en la muestra de residuos, %.

Nota : Si los residuos volantes y los residuos del horno difieren sustancialmente en el contenido de combustible, las pérdidas deben ser estimadas por separado.

$$L_{CR} = L_{CRH} + L_{CRC} + L_{CRV} \quad 5.9$$

Donde:

L_{CRH} - Pérdida por combustible no quemado en los residuos del horno, Btu/lb.

L_{CRC} - Pérdida por combustible no quemado en los residuos en los colectores de ceniza, Btu/lb.

L_{CRV} - Pérdida por combustible no quemado en los residuos volantes, Btu/lb.

$$L_{CHk} = W_{Rk} \cdot H_{Rk}$$

$$L_{CHc} = W_{Rc} \cdot H_{Rc}$$

$$L_{CHv} = W_{Rv} \cdot H_{Rv}$$

Donde:

W_{Rk} , W_{Rc} , W_{Rv} - lb de residuos en el horno, en los colectores y volantes por lb de combustible, lb/lb.

H_{Rk} , H_{Rc} , H_{Rv} - poder calorífico de los residuos del horno, residuos en los colectores y residuos volantes, Btu/lb.

5. Pérdidas por radiación, L_R

Esta pérdida se obtiene por carta de la ABMA ("American Boilers Manufacturers Association"), y se corrige para temperaturas y velocidades del aire diferentes de 50 °F y 100 pie/min (1.66 pie/seg) por el gráfico complementario (ver anexos).

La pérdida se obtiene en %, por lo que para expresarla en Btu/lb se multiplica por el poder calorífico superior del combustible y se divide entre 100.

6. Pérdidas indeterminadas, L_I

El valor de estas pérdidas se debe definir por acuerdo entre las partes involucradas en la prueba.

Como orientación al respecto se pueden estimar:

- Para combustibles líquidos y gaseosos. $L_I = 1.0 \%$

- Para combustibles sólidos. $L_I = 1.5 \%$

Para expresarla en Btu/lb se multiplican por el poder calorífico superior del combustible.

La suma total de las pérdidas será:

$$L = L_g + L_{WF} + L_H + L_{CR} + L_R + L_I \quad 5.10$$

y la Eficiencia por el Método de las Pérdidas:

$$\eta_g = 100 - \frac{L}{H_f} \cdot 100, \% \quad 5.11$$

Eficiencia por el Método de Entrada-Salida.

$$\eta_{es} = \frac{Q_U}{H_f} \cdot 100 \quad 5.12$$

Donde:

H_f - Poder calorífico superior del combustible, Btu/lb.

Q_u - Calor total absorbido por el fluido de trabajo, Btu/lb.

$$Q_U = D_v \cdot (h_{vs} - h_{as}) + D_r \cdot (h_{vr} - h_{ar}) + D_p \cdot (h_{ls} - h_{as}) \quad 5.13$$

Donde:

D_v, D_r, D_p - Gasto de vapor sobrecalentado, vapor recalentado y purga continua, lb/h.

h_{vs} - Entalpía de vapor sobrecalentado, Btu/lb.

h_{ar}, h_{vr} - Entalpía de salida y de entrada al recalentador respectivamente, Btu/lb.

h_{ls} - Entalpía de líquido saturado a la presión del domo, Btu/lb.

d) Pérdidas de calor por radiación y convección, q_s .

Durante el funcionamiento de los generadores de vapor, las superficies exteriores del horno y los conductos, los colectores, el domo, conductos de gases, tuberías, etc., alcanzan una temperatura superior a la ambiental. Este gradiente de temperatura genera una transferencia de calor al medio exterior que se efectúa por dos mecanismos fundamentales: convección y radiación, lo que representa una pérdida de calor, en ocasiones significativa, que afecta la eficiencia del generador de vapor. A este tipo de pérdidas generalmente se les denomina "pérdidas por radiación", y su magnitud depende fundamentalmente de las dimensiones de la unidad (capacidad nominal), carga y de la temperatura y velocidad del aire exterior.

En el diseño de los generadores de vapor se tienen en cuenta una serie de factores para reducir la magnitud de estas pérdidas, entre ellos podemos citar el cálculo y selección correctos de los materiales aislantes, y la utilización de paredes de agua, logrando un compromiso con los costos de fabricación del equipo.

En la actualidad existen métodos prácticos para la determinación de la magnitud de estas pérdidas, aunque las mismas podrían determinarse por las ecuaciones convencionales que describen los procesos de transferencia de calor. Estudios e investigaciones realizadas han permitido generalizar métodos prácticos para la determinación de estas pérdidas fundamentalmente para generadores de mediana y alta capacidad. La Asociación Americana de Fabricantes de Generadores de Vapor ("American Boiler Manufacturers Association", ABMA) ha generalizado un nomograma para la estimación de estas pérdidas en función de la capacidad nominal, producción y características de los generadores de vapor.

Esta pérdida, expresada en % de la energía de entrada (calor disponible), se reduce al aumentar la potencia nominal de la caldera, mientras más compacto es su diseño y cuando esta trabaja a cargas cercanas a la nominal.

Conociendo las pérdidas por radiación a carga nominal, para cargas diferentes se pueden estimar como:

$$q_s = q_{s, nom} \cdot \frac{D_{nom}}{D}$$

Donde:

q_s - Pérdidas por radiación, %.

$q_{s, nom}$ - Pérdidas por radiación a carga nominal, %.

D - Flujo de vapor real, kg/h.

D_{nom} - Capacidad nominal, kg/h.

La pérdida de calor por radiación y convección es usualmente pequeña en generadores de vapor de media y alta capacidad, pero se convierte en una de las principales pérdidas en calderas de pequeña potencia.

Son dos las causas principales que pueden provocar un incremento de esta pérdida durante la explotación:

- El deterioro del aislamiento térmico de la caldera.
- La operación a cargas reducidas.

e) Pérdidas con el calor físico de los residuos del horno, q_6 .

Esta pérdida solo tiene significación para combustibles sólidos, y está dada por la extracción de residuos de combustible del horno (escoria y cenizas) con una temperatura superior al medio ambiente.

$$q_6 = \frac{A \cdot a_e \cdot C_{pe} \cdot T_e}{Q_d} \quad 4.14$$

Donde:

q_6 - Pérdidas con el calor físico de los residuos del horno expresada en % del calor disponible.

A - Contenido de ceniza en el combustible, %

a_e - Fracción de la ceniza del combustible que permanece con los residuos del horno.

C_{pe} - Calor específico de la ceniza a la temperatura T_e , kJ/ kg·°C

T_e - Temperatura de extracción de los residuos de combustible del horno °C.

Para hornos con extracción sólida de la escoria $T_e = 600-700^\circ\text{C}$, para extracción líquida $T_e = T_f + 100^\circ\text{C}$, siendo T_f la temperatura de fusión de la ceniza del combustible.

f) Pérdidas por purgas, q_7

Esta pérdida está asociada a la diferencia de temperatura entre el agua (saturada) extraída de la caldera para mantener la concentración de sustancias perjudiciales dentro del rango recomendado, y el agua de alimentación. Algunos autores consideran el calor asociado a las purgas como calor útil, mientras que otros lo suman a las pérdidas. Dicho calor se determina por la expresión:

$$Q_7 = D_p \cdot (h_{ts} - h_{aa}) / B_c \quad 4.15$$

Donde:

Q_7 - Calor perdido con las purgas por unidad de combustible, kJ/kg (kJ/m³N).

D_p - Gasto de agua extraída, kg/h. Este gasto oscila entre 1 y 4% del gasto de vapor.

h_{ts} - Entalpía del agua de caldera (líquido saturado a la presión del domo) kJ/kg.

h_{aa} - Entalpía del agua de alimentación, kJ/kg.

B_c - Gasto de combustible, kg/h (m³N/h para combustibles gaseosos).

CAPÍTULO 3- EFICIENCIA TÉRMICA DE LOS GENERADORES DE VAPOR.

Introducción.

La eficiencia térmica es el indicador más importante del trabajo de un generador de vapor, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo.

Sobre la eficiencia térmica de un generador de vapor influyen muchos factores, pero estos pueden englobarse en tres aspectos básicos para obtener una alta eficiencia:

1. La combustión completa del combustible, lograda con una mínima cantidad de aire en exceso.
2. El enfriamiento profundo de los productos de la combustión.
3. La reducción de las pérdidas de calor por radiación y convección al medio circundante.

Ecuación de balance térmico.

El balance térmico de una caldera operando a régimen estacionario puede escribirse en la siguiente forma simplificada:

$$Q_d = Q_1 + Q_p \quad 3.1$$

Donde:

Q_d - Calor disponible, constituye la energía de entrada al generador por unidad de masa del combustible.

Q_1 - Calor útil, constituye el calor transferido al agente de trabajo.

Q_p - Pérdidas térmicas, representa la suma de todas las pérdidas que ocurren en los procesos de combustión y transferencia de calor en el generador de vapor.



Figura 5- Esquema simplificado del balance térmico en un generador de vapor.

Existen dos métodos para determinar la eficiencia de un generador de vapor a partir de la ecuación de balance térmico: métodos directo e indirecto.

MÉTODO DIRECTO

Se basa en relacionar directamente la producción del generador de vapor con el consumo, y determinar la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) del calor disponible (consumo).

$$\eta = [Q_u/Q_d] \times 100, \quad \% \quad 3.2$$

MÉTODO INDIRECTO

Este método parte de determinar la suma de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y luego determinar, indirectamente, la eficiencia como el porcentaje restante.

$$\eta = 100 - \Sigma q_p, \quad \% \quad 3.3$$

Donde:

$$\Sigma q_p = [\Sigma Q_p/Q_d] \times 100, \quad \% \quad 3.4$$

Antes de analizar la forma de determinar cada uno de los términos presentes en la ecuación de balance térmico del generador de vapor, veamos previamente algunas características de los flujos de aire y de gases de combustión que intervienen en los mismos.

Volumen de los productos de la combustión.**a) Combustibles sólidos y líquidos**

El volumen de los gases de combustión se puede dividir para su cálculo en volumen de gases secos y volumen de vapor de agua (por kg de combustible).

$$V_g = V_{gs} + V_{H_2O}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \quad 3.5$$

$$\begin{aligned} V_{gs} &= V_{^o gs} + (\alpha - 1) \cdot V_{^o a}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \\ V_{gs} &= V_{RO_2} + V_{^o N_2} + (\alpha - 1) \cdot V_{^o a}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \end{aligned} \quad 3.6$$

Donde:

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= V_{CO_2} + V_{SO_2}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \\ V_{RO_2} &= 0.01866 \cdot (C + 0.375 \cdot S), \quad m^3 \text{ N/ kg} \\ V_{^o N_2} &= 0.79 \cdot V_{^o a} + 0.008 \cdot N, \quad m^3 \text{ N/ kg} \end{aligned} \quad 3.7$$

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= V_{^o H_2O} + 0.00161 \cdot da \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{^o a}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \\ V_{^o H_2O} &= 0.111 \cdot H + 0.0124 \cdot W + 0.00161 \cdot da \cdot V_{^o a} + 1.24 \cdot G_{ut}, \quad m^3 \text{ N/ kg} \end{aligned} \quad \begin{matrix} 3.8 \\ 3.9 \end{matrix}$$

Donde:

da- Humedad absoluta del aire, g/kg.

G_{at}- Flujo de vapor de atomización (en caso que proceda), kg vapor/kg comb.

G_{at} = 0.02 – 0.1 kg_v / kg_c para quemadores de plantas termoeléctricas.

G_{at} = 0.1 – 1 kg_v / kg_c para quemadores industriales.

$$V_g = VRO_2 + V^oN_2 + V^oH_2O + (\alpha - 1) V^oa + 0.00161 \cdot da \cdot (\alpha - 1) V^oa, \text{ m}^3 \text{ N/ kg} \quad 3.10$$

Nota: Los volúmenes de gases con superíndice " ° " se refieren a volúmenes para una combustión estequiométrica.

b) Combustibles gaseosos

Para los combustibles gaseosos el volumen de los **gases triatómicos** se determina también sobre la base de las reacciones químicas de la combustión.

Así, para la combustión del monóxido de carbono ($CO + 0.5 \cdot O_2 = CO_2$) para 1 m³ de CO se obtiene 1 m³ de CO₂. Análogamente se determina el volumen de gases triatómicos (m³N/m³N) formados en la combustión de otros componentes.

Como resultado del procedimiento anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$VRO_2 = 0.01 \cdot (CO_2 + CO + H_2S + \sum m \cdot CmHn), \text{ m}^3 \text{ N/m}^3 \text{ N} \quad 3.11$$

El **volumen teórico de Nitrógeno** (para $\alpha=1$) se determina por la fórmula:

$$V^oN_2 = 0.79 \cdot V^oa + 0.01 \cdot N_2, \text{ m}^3 \text{ N/m}^3 \text{ N} \quad 3.12$$

El **volumen teórico de vapor de agua** se calcula por la expresión:

$$V^oH_2O = 0.01 \cdot (H_2 + H_2S + \sum n/2 \cdot CmHn + 0.124 \cdot dg + 0.161 \cdot da \cdot V^oa), \text{ m}^3 \text{ N/m}^3 \text{ N} \quad 3.13$$

Donde:

dg – Humedad del combustible, g/m³ de gas seco.

da – Humedad del aire de combustión, g/m³ de aire seco.

Volumen real de gases.

Los volúmenes reales (para $\alpha > 1$) se determinan por las expresiones siguientes:

Volumen de gases secos:

$$V_{gs} = VRO_2 + V^oN_2 + (\alpha - 1) \cdot V^oa, \text{ m}^3 \text{ N/m}^3 \text{ N} \quad 3.14$$

$$V_{H_2O} = V^o_{H_2O} + 0.00161 \cdot da \cdot (\alpha - 1) \cdot V^o_a, \text{ m}^3\text{N/m}^3\text{N} \quad 3.15$$

Y el volumen total real de gases:

$$V_g = V_{gs} + V_{H_2O} \quad 3.16$$

Entalpía del aire y de los productos de la combustión.

Entalpía del aire.

$$I^o_a = V^o_a \cdot C_a \cdot T_a, \text{ kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)} \quad 3.17$$

$$I_a = \alpha \cdot V^o_a \cdot C_a \cdot T_a, \text{ kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)}$$

Donde:

V^o_a - Volumen de aire teórico por unidad de masa del combustible, $\text{m}^3\text{N/kg}$ (o de volumen en el caso de combustibles gaseosos, $\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}$)

T_a - Temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$.

C_a - Calor específico a presión constante del aire a temperatura T_a , $\text{kJ/m}^3\text{N} \cdot ^{\circ}\text{C}$

Entalpía de los productos de combustión.

$$I_g = I^o_g + I^o_a \cdot (\alpha - 1) + I_c, \text{ kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)} \quad 3.18$$

Donde:

I^o_g - Entalpía de la cantidad teórica de gases, $\text{kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)}$

$I^o_g = V_{RO_2} \cdot C_{RO_2} \cdot T_g + V_{N_2} \cdot C_{N_2} \cdot T_g + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} \cdot T_g, \text{ kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)}$

I^o_a - Entalpía de la cantidad teórica de aire a la temperatura de salida, $\text{kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)}$

I_c - Entalpía de los residuos volátiles (ceniza arrastrada), $\text{kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)}$

$I_c = 0.01 \cdot A_t \cdot a_v \cdot C_{oe} \cdot T_g$

a_v - Fracción de ceniza que es arrastrada por los gases de combustión.

Para cálculos rápidos se puede utilizar la expresión aproximada:

$$I_g = V_g \cdot C_g \cdot T_g, \text{ kJ/kg (kJ/m}^3\text{N)} \quad 3.19$$

Donde:

$C_g = 1.35 + 0.0000753 \cdot T_g, \text{ kJ / m}^3\text{N } ^{\circ}\text{C}$

Anexo D. Mezclas Vitonas-Carretera Y Valle (Propal)-Carretera

MEZCLAS VITONAS - CARRETERA Y VALLE (PROPAL) - CARRETERA

MEZCLA:

OPCIÓN MEZCLA	RELACIÓN Valle/Carret
5Vp 2C	2,50
3Vp 2C	1,50

MEZCLA:

OPCIÓN MEZCLA	RELACIÓN Valle/Carret
5VIT 2C	2,50
3VIT 2C	1,50

17 DE MARZO

MERCES (Vp) - COOCARBON, PLANTERRA, MINA GOMEZ (C)

% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
4,95	23,46	30,91	2,1	10863
4,65	20,13	31,91	1,87	11797

VITONAS (VIT) - COOCARBON, PLANTERRA, MINA GOMEZ (C)

% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
5,30	20,50	25,35	2,24	11767
5,35	18,82	24,71	2,37	11994

26 DE MARZO

FERREIRA (Vp) - COOCARBON, PLANTERRA, EXCARBON (C)

% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
4,1	30,63	29,26	2,78	10.006
3,75	22,21	29,8	2,18	11.235

VITONAS (VIT) - COOCARBON, PLANTERRA, EXCARBON (C)

% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
4,65	26,81	29,36	2,42	10.595
4,70	21,02	30,52	2,21	11.524

Anexo E. Análisis De Carbón De Tolva 2008

ANALISIS DE CARBON DE TOLVA 2008					
IDENTIFICACION MUESTRA	% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
12-Feb	6,3	26,18	29,19	2,35	10755
13-Feb	5,7	21,05	30,87	1,81	11523
14-Feb	5,50	17,01	33,1	2,62	12310
15-Feb	6,15	21,42	30,13	1,57	11586
21-Feb	6,5	21,91	29,8	2,13	11226
22-Feb	7,5	22,94	31,18	2,13	11008
26-Feb	7,2	23,25	22,18	1,73	11074
28-Feb	6,35	27,36	23,56	2,14	10245
07-Mar	6,10	20,29	32,74	1,76	11516
10-Mar	4,40	24,58	28,80	1,58	11024
08-Abr	5,9	27,9	29,83	3,02	10436
09-Abr	4,10	17,73	33,52	1,94	11928
10-Abr	5,35	27,25	29,35	3,15	10313
11-Abr	5,25	21,34	31,86	2,35	11318
13-Abr	7,20	24,02	30,08	1,86	11046
15-Abr	3,75	21,26		1,86	11443
16-Abr	5,50	25,04		1,71	10893
17-Abr	5,10	22,39		1,73	11322
18-Abr	5,80	29,17		1,42	10263
21-Abr	5,20	21,73		2,24	11288
22-Abr	5,30	24,11		2,24	10881
PROMEDIO	5,72	23,23	29,75	2,06	11.114

Anexo F. Consumo de Carbón Vs. Generación Vapor Mayo –Junio - Julio

Consumo Carbón Vs. Generación – Mayo Generación- Julio

FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
08-May	428,73	5.293	12,35
09-May	479,44	5.478	11,43
10-May	435,58	5.212	11,96
11-May	495,21	5.263	10,63
12-May	462,93	3.403	7,35
13-May	501,57	6.692	13,34
14-May	463,54	5.113	11,03
15-May	487,71	5.407	11,09
16-May	476,85	5.337	11,19
17-May	504,82	5.303	10,51
18-May	473,5	5.017	10,60
19-May	458,72	5.337	11,63
20-May	471,66	5.516	11,70
21-May	417,3	5.038	12,07
22-May	485,88	5.022	10,34
23-May	487,22	5.580	11,45
24-May	452,98	5.374	11,86
25-May	416,31	5.064	12,16
26-May	419,64	5.022	11,97
27-May	430,3	4.890	11,36
28-May	474,15	4.643	9,79
29-May	482,74	4.846	10,04
30-May	482,9	5.295	10,96
PROMEDIOS	464,77	5.180	11,17

GRAFICA TESIS - JUNIO

Consumo Carbón Vs. Generación – Junio

CONSUMO CARBON Vs. GENERACION - JUNIO			
FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
01-Jun	343,83	1.612	4,69
02-Jun	183,62	5.487	29,88
03-Jun	355,402	3.454	9,72
04-Jun	438,09	4.881	11,14
05-Jun	459,64	5.077	11,04
06-Jun	412,79	5.232	12,67
07-Jun	339,14	4.977	14,68
08-Jun	366,56	5.034	13,73
09-Jun	423,71	5.111	12,06
10-Jun	378,26	5.182	13,70
11-Jun	379,02	5.143	13,57
12-Jun	395,74	5.024	12,70
13-Jun	421,13	5.430	12,89
14-Jun	433,89	4.491	10,35
15-Jun	400,89	5.084	12,68
16-Jun	405,55	4.772	11,77
17-Jun	386,2	4.875	12,62
18-Jun	428,83	5.237	12,21
19-Jun	428,06	5.186	12,11
20-Jun	430,57	5.285	12,27
21-Jun	442,42	5.321	12,03
22-Jun	428,00	5.047	11,79
23-Jun	378,84	5.034	13,29
24-Jun	379,59	5.443	14,34
25-Jun	368,76	5.264	14,28
26-Jun	436,88	5.816	13,31
27-Jun	423,76	5.392	12,72
28-Jun	402,41	5.521	13,72
29-Jun	385,76	4.133	10,71
30-Jun	430,68	5.773	13,41
PROMEDIOS	396,27	4.977,27	12,87

Consumo Carbón Vs.

CONSUMO CARBON Vs. GENERACION VAPOR- JULIO			
FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
01-Jul	359,01	5.413	15,08
02-Jul	397,46	5.513	13,87
03-Jul	410,57	5.232	12,74
04-Jul	382,53	5.453	14,25
05-Jul	413,5	5.680	13,74
06-Jul	310,15	4.338	13,99
07-Jul	352,79	4.990	14,14
08-Jul	363,47	5.005	13,77
09-Jul	334,38	4.915	14,70
10-Jul	364,05	5.197	14,28
11-Jul	365,91	5.143	14,05
12-Jul	354,73	5.629	15,87
13-Jul	349,79	5.612	16,04
14-Jul	359,48	5.474	15,23
15-Jul	322,03	5.355	16,63
16-Jul	361,21	5.616	15,55
17-Jul	357,88	5.526	15,44
18-Jul	288,23	4.420	15,34
PROMEDIOS	358,18	5.250,55	14,71

Anexo G. Toneladas Vapor / Toneladas de Carbón Mayo – Junio - Julio

CONSUMO CARBON Vs. GENERACION - MAYO			
FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
08-May	428,73	5.293	12,35
09-May	479,44	5.478	11,43
10-May	435,58	5.212	11,96
11-May	495,21	5.263	10,63
12-May	462,93	3.403	7,35
13-May	501,57	6.692	13,34
14-May	463,54	5.113	11,03
15-May	487,71	5.407	11,09
16-May	476,85	5.337	11,19
17-May	504,82	5.303	10,51
18-May	473,5	5.017	10,60
19-May	458,72	5.337	11,63
20-May	471,66	5.516	11,70
21-May	417,3	5.038	12,07
22-May	485,88	5.022	10,34
23-May	487,22	5.580	11,45
24-May	452,98	5.374	11,86
25-May	416,31	5.064	12,16
26-May	419,64	5.022	11,97
27-May	430,3	4.890	11,36
28-May	474,15	4.643	9,79
29-May	482,74	4.846	10,04
30-May	482,9	5.295	10,96
PROMEDIOS	464,77	5.180	11,17

CONSUMO CARBON Vs. GENERACION - JUNIO			
FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
01-Jun	343,83	1.612	4,69
02-Jun	183,62	5.487	29,88
03-Jun	355,402	3.454	9,72
04-Jun	438,09	4.881	11,14
05-Jun	459,64	5.077	11,04
06-Jun	412,79	5.232	12,67
07-Jun	339,14	4.977	14,68
08-Jun	366,56	5.034	13,73
09-Jun	423,71	5.111	12,06
10-Jun	378,26	5.182	13,70
11-Jun	379,02	5.143	13,57
12-Jun	395,74	5.024	12,70
13-Jun	421,13	5.430	12,89
14-Jun	433,89	4.491	10,35
15-Jun	400,89	5.084	12,68
16-Jun	405,55	4.772	11,77
17-Jun	386,2	4.875	12,62
18-Jun	428,83	5.237	12,21
19-Jun	428,06	5.186	12,11
20-Jun	430,57	5.285	12,27
21-Jun	442,42	5.321	12,03
22-Jun	428,00	5.047	11,79
23-Jun	378,84	5.034	13,29
24-Jun	379,59	5.443	14,34
25-Jun	368,76	5.264	14,28
26-Jun	436,88	5.816	13,31
27-Jun	423,76	5.392	12,72
28-Jun	402,41	5.521	13,72
29-Jun	385,76	4.133	10,71
30-Jun	430,68	5.773	13,41
PROMEDIOS	396,27	4.977,27	12,87

CONSUMO CARBON Vs. GENERACION VAPOR- JULIO			
FECHA	CONSUMO	GENERACION	TON. VAPOR x TON.CARBON
01-Jul	359,01	5.413	15,08
02-Jul	397,46	5.513	13,87
03-Jul	410,57	5.232	12,74
04-Jul	382,53	5.453	14,25
05-Jul	413,5	5.680	13,74
06-Jul	310,15	4.338	13,99
07-Jul	352,79	4.990	14,14
08-Jul	363,47	5.005	13,77
09-Jul	334,38	4.915	14,70
10-Jul	364,05	5.197	14,28
11-Jul	365,91	5.143	14,05
12-Jul	354,73	5.629	15,87
13-Jul	349,79	5.612	16,04
14-Jul	359,48	5.474	15,23
15-Jul	322,03	5.355	16,63
16-Jul	361,21	5.616	15,55
17-Jul	357,88	5.526	15,44
18-Jul	288,23	4.420	15,34
PROMEDIOS	358,18	5.250,55	14,71

Anexo H. Análisis Elemental Y Próximo De Combustibles

FORMATO 11.3 ENTREGA DE RESULTADOS ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL

Informe No: 005-06 Cliente: INCAJICA S.A.
Fecha (d-m-a): 15/04/2009 Tipo Muestra: Carbón
Identificación: Carbón
Humedad Superficial (%): 1.74
Humedad Residual (%): 2.84
Humedad Total (%): 4.58

Elemental

Análisis	Norma ASTM	Resultado	Referencia
Humedad (%)	D-1542	1.74	
Carbón (%)	D-1542	26.35	27.13
Carbón (%)	D-1553	47.41	48.80
Ásforo (%)	D-1553	1.30	1.30
Nitrógeno (%)	D-1553	1.08	1.11
Sulfuro (%)	D-1553	2.40	2.50
Cloruro (%)	D-1553	18.57	17.35

Proximal

Análisis	Norma ASTM	Resultado	Referencia
Humedad (%)	D-1542	2.84	
Ásforo (ppm) (%)	D-1542	24.57	25.38
Carbón (%)	D-1542	26.35	27.13
Carbón (ppm) (%)	D-1553	46.34	47.36
Poder Calorífico (BTU/lb.)	D-1558	14451	14750
Sulfuro (%)	D-1558	2.40	2.50

Análisis	Norma	Resultado
Índice de Proximate (Standard)	ISO 1783:2007	

Observaciones: El muestreo fue realizado por el cliente y la muestra fue preparada conforme a la norma ASTM D 2013.

M. Sc. Jaime José Acosta P.
Jefe de Laboratorio

Ing. Francisco J. Velasco S.
Profesional de Laboratorio

El Laboratorio no es responsable de los resultados por los
resultados obtenidos, con las muestras recibidas a ensayo.

Informe No:	007-01	Cliente:	INCAJICA S.A.
Fecha (YYYY):	15/04/2008	Tipo Muestra:	Control
Identificador:	Bogotá - CA - ASIN 01		
Numero Superior (%):	44.15		
Numero Pasado (%):	52.11		
Numero Total (%):	50.01		

Variable	Variable Actual	Ratio to Avg	Ratio
Turnover (%)	0.202	12.17	
Interest Expense (%)	0.202	50.72	77.55
Capital (%)	0.202	15.35	15.87
Current Pmt (%)	0.277	4.25	0.88
Debt Capitalization Ratio	0.202	0.07	0.017
Debt (%)	0.202	0.08	0.07

© 2011 Blackwell Publishing Ltd *Journal of Internal Medicine* 270: 103–112

Prof. Francisco J. Varela M.
Departamento de Lenguajes

139

Informe No:	001-08	Cliente:	INDALCA S.A.
Fecha (d/m/a):	11/04/2008	Tipo Muestra:	Catión
Identificación:	Bogotá (24.Abr.08)		
Humedad Superficial (%):	43.87		
Humedad Residual (%):	12.83		
Humedad Total (%):	56.70		

Antigen	70000 AOTM	70000 B AOTM	70000
Chickens (20)	0.0752	12.82	
Cowpox (20)	0.0742	12.11	12.89
Cowpox (20)	0.0771	37.28	42.74
Hydrophox (20)	0.0771	4.20	4.82
Hydrophox (20)	0.0771	0.71	0.87
Avian (20)	0.0739	0.06	0.10
Deer (20)	0.0771	32.82	37.43

Variable	Normal ASFA	Seco al Aire	Seco
Acetone (%)	0.1542	12.82	
Isopropanol (%)	0.1542	97.18	77.87
Carbons (%)	0.1542	12.10	10.89
Carbon (%)	0.1572	7.88	8.84
Prop. Carbon (20°C)	0.1885	64.12	73.84
Water (%)	0.4319	0.08	0.16

(C) 2013 American Bank of Commerce

ing. President J. Yehon-
Shalom is a surgeon.

140